

宝典丛书 200万

ANSYS 12.0

宝典

重点关注结构分析领域, 针对材料、机械、土木三大热点应用领域。

根据作者8年多高校授课的精髓, 孜孜以求, 精心打造。

光盘中包含每章实例的数据库文件与命令流文件, 加速学习, 消化进程。

刘伟 高维成 于广滨 编著
赖一楠 主审



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

宝 典 丛 书

ANSYS 12.0 宝典

刘 伟 高维成 于广滨 编著

赖一楠 主审

電 子 工 業 出 版 社 ·

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书通过大量精心设计的具有实际工程应用背景的原创性分析实例,以图形用户界面及命令流两种方式向读者全面介绍 ANSYS 12.0 结构有限元分析方法及应用。主要包括以下 4 部分内容: ANSYS 基础,内容包括 ANSYS 12.0 结构有限元分析概述、几何建模与网格划分、施加载荷与求解过程、结果后处理、APDL 编程语言; ANSYS 结构有限元分析基本过程,内容包括杆系结构有限元分析、梁系结构有限元分析、板壳结构有限元分析、实体结构有限元分析; ANSYS 高级分析实例详解,内容包括结构动力学分析、结构非线性分析、结构稳定性分析; ANSYS 工程应用实战演练,内容包括 ANSYS 在复合材料结构中的应用、ANSYS 在机械工程中的应用、ANSYS 在土木工程中的应用。

本书内容全面新颖、实例原创丰富、讲述循序渐进、应用领域广泛,通过本书的学习,读者可逐步提高自身的 ANSYS 操作水平以及利用有限元分析理论进行结构分析的能力,最终具备在结构分析领域解决实际工程问题的思路、方法和能力。

本书可作为力学、土木、机械、航空、航天、船舶、水利、交通、桥梁等专业高年级本科生或研究生学习 ANSYS 12.0 有限元分析软件的教材,也可供从事上述专业结构分析的工程技术人员参考使用。

**未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。**

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 12.0 宝典 / 刘伟, 高维成, 于广滨编著. —北京: 电子工业出版社, 2010.7

(宝典丛书)

ISBN 978-7-121-10907-2

I. ①A… II. ①刘… ②高… ③于… III. ①有限元分析—应用程序, ANSYS IV. ①0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 091922 号

责任编辑: 周 林

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱

邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16

印张: 37.5

字数: 1068 千字

印 次: 2010 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 79.00 元(含光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件到 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前言

目前,几乎所有高校的力学、土木、机械、航空、航天、船舶、水利、交通、桥梁等理工科专业,都为高年级本科生开设了《有限元方法》基础课程,为研究生开设了《非线性有限元方法》学位课程。学生在学习完有限元课程之后,还必须熟练掌握相关有限元软件的使用,才能将有限元基本理论有效地应用到实际工程问题分析中去。为此,部分有条件的高校也开设了有限元软件应用课程(课程名称可能会因学校及专业的不同而有所差异,但都是以讲解有限元软件 ANSYS 或其他软件为主)。哈尔滨工业大学航天学院工程力学专业 20 世纪 90 年代末即开设了该类课程《应用软件工程——ANSYS》,作者从 2003 年开始接手讲授该门课程。虽然市面上的 ANSYS 书籍很多,但却难以找出一本非常适合做教材的书籍,因此作者参考多本书籍自主编写了校内讲稿。经过 6 年多的试用,目前已基本成型,现将多年的校内讲稿和心得体会完善成书,以期与开设该类课程的兄弟院校分享、共勉,同时也供从事相关科研与工程项目的人员参考阅读。

ANSYS 软件是目前国际上最著名的大型通用有限元分析软件,经过三十年的发展,已形成融结构、热、流体、电磁、声学及多物理场耦合为一体的大型通用有限元分析软件,广泛应用于航空航天、石油、化工、汽车、造船、铁道、电子、机械制造、地矿能源、水利、核能、生物、医学、土木工程、轻工、一般工业及科学研究等各个领域,其极强的分析功能覆盖了几乎所有的工程问题。作为世界最具权威的有限元产品和工业化分析标准,目前几乎所有的 CAD/CAE/CAM 软件都竞相开发了与 ANSYS 的专用接口,实现数据的共享和交换,如 Pro/ENGINEER、NASTRAN、Alogor、I-DEAS 及 AutoCAD 等。ANSYS 软件在 Linux 和 Windows 下均有版本,并同时有 32 位和 64 位版本,目前最新的版本为 12.0。

本书以 ANSYS 12.0 版本为依据,以 Windows NT 为操作平台,将结构有限元分析的基本理论与 ANSYS 实践操作紧密结合,通过大量精心筛选的具有实际工程应用背景的原创性分析实例,以图形用户界面和命令流两种方式向读者全面介绍了 ANSYS 结构有限元分析方法。

导读

本书在内容组织上分为 4 部分,共 15 章内容,知识点循序渐进、由浅入深,具体安排如下。

第 1 部分 ANSYS 基础

第 1 部分包括第 1 章至第 5 章,内容分别为 ANSYS 12.0 结构有限元分析概述、几何建模与网格划分、施加载荷与求解过程、结果后处理、APDL 编程语言。该部分对 ANSYS 程序的基本功能、操作过程和编程语言进行了深入细致的讨论,不单纯局限于菜单操作,而是结合实例进行讲解,内容生动。该部分适合于渴望入门的新手学习,作为入门教材参考使用。

第 2 部分 ANSYS 结构有限元分析基本过程

第 2 部分包括第 6 章至第 9 章,内容分别为 ANSYS 杆系结构有限元分析、ANSYS 梁系结构

有限元分析、ANSYS 板壳结构有限元分析、ANSYS 实体结构有限元分析。该部分按照常规有限元书籍的书写顺序，从杆梁一维结构到板壳二维结构，最后到实体三维结构，每章列举 2 个典型的工程实例，以实例驱动方式进行结构有限元分析基本过程的讲解，令读者记忆深刻。该部分适合于具有一定基础的高年级本科生作为《应用软件工程——ANSYS》的教材参考使用。

第 3 部分 ANSYS 高级分析实例详解

第 3 部分包括第 10 章至第 12 章，内容分别为 ANSYS 结构动力学分析、ANSYS 结构非线性分析和 ANSYS 结构稳定性分析。该部分介绍了结构分析中经常用到的高级分析专题，每章列举 2 个典型的工程实例，同时介绍了每个专题的基本概念和具体操作过程。该部分适合于具有较高基础的研究生作为《高等结构动力学》、《非线性有限元》课程的补充教材参考使用。

第 4 部分 ANSYS 工程应用实战演练

第 4 部分包括第 13 章至第 15 章，内容分别为 ANSYS 在复合材料结构中的应用、ANSYS 在机械工程中的应用和 ANSYS 在土木工程中的应用。该部分覆盖了结构有限元分析最常应用的领域，即材料、机械和土木工程。其中，复合材料领域列举了 2 个典型工程实例，机械工程领域和土木工程领域分别列举了 4 个典型工程实例。该部分中所有的实例均为作者多年来曾经设计过的一些实际工程，具有典型的代表意义，可以帮助读者将 ANSYS 结构有限元分析方法融会贯通。该部分适合于希望解决实际工程问题的高级用户和希望在有限元结构分析领域提升职业竞争力的读者参考使用。

相信通过本书的学习，读者定能迅速地提高自身的 ANSYS 操作水平，打好利用有限元分析理论进行结构分析的功底，从而具备在结构分析领域解决实际工程问题的能力。

特色

- ◆ **专注结构分析领域**——为避免内容大而泛的弊端，本书将重点放于结构分析领域，选择材料、机械、土木 3 个热点应用领域进行详细讲解，本书的工程应用实战演练部分覆盖了上述各个领域中的典型应用，工程实例都是从作者的实际工程及科研项目中提炼出来的，具有非常重要的参考价值。
- ◆ **知识点循序渐进**——本书在章节安排上由浅入深、层次分明，读者可以从基础部分入门，再通过结构有限元分析基本过程部分掌握结构静力学有限元分析的基本技能，然后通过高级分析实例详解部分提升高级分析的实际应用能力，最后通过工程应用实战演练部分提高分析解决实际工程问题的能力。读者可以一气呵成地完成从入门级到专业级的蜕变过程。
- ◆ **图形用户界面与命令流并行**——每章的实例详解部分都是通过图形用户界面（GUI）和命令流两种方式对读者进行了详细的讲解，让读者在熟悉图形用户界面操作的同时，也掌握命令流操作的基本方法，极大地丰富读者的分析手段，提高工作效率，提升高级分析的能力。
- ◆ **增加“提示”及“注意”段落**——在通过图形用户界面讲解具体操作的过程中，增加了很多“提示”和“注意”段落，“提示”可以在适当地方给读者一些提示，使读者能迅速理解作者的分析思路及意图，“注意”可以在容易出现问题的地方及时提醒读者注意，避免读者犯一些易犯错误，为读者节省宝贵时间。

- ◆ **光盘内容丰富且配备习题**——购买本书还赠送一张精彩实用的光盘，其中包括每章实例详解例题的数据库文件和命令流文件，读者可以从光盘中直接读取文件并进行相应分析，以最直接的方式快速掌握 ANSYS 软件。光盘中还配备了每章的习题，读者可以亲自动手测试一下自己对知识点的掌握程度。通过对习题的操作练习，对各章知识进行系统的回顾，进而举一反三、触类旁通。

约定

为了便于读者阅读理解，本书作如下约定：

- ◆ 本书用“→”表示上下级菜单或命令的关联，例如 Utility Menu→File→Save as，表示选择通用菜单中的 File 菜单，执行其中的 Save as 命令；又如 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，表示在主菜单中依次选择 Preprocessor、Material Props、Material Models 命令，最后出现 Define Material Model Behavior 对话框，其他依此类推。
- ◆ 在没有特别说明时，“单击”、“双击”表示用鼠标左键单击、双击。
- ◆ 命令流中“!”后面的中文为解释说明部分，读者在使用命令流过程中不必输入。但读者在日后自己编程时，应养成良好习惯，在关键步骤后面加上注解，以便后续的解读。

读者

本书非常适合于作为力学、土木、机械、航空、航天、船舶、水利、交通、桥梁等相关专业高年级本科生或研究生学习《应用软件工程——ANSYS》的主要参考书。对于从事结构分析的工程技术人员，本书也是很有价值的参考资料。

致谢

本书由哈尔滨工业大学航天学院刘伟、高维成、于广滨主编，由哈尔滨理工大学赖一楠教授担任本书的主审。多年以来，作者一直从事哈尔滨工业大学工程力学专业《应用软件工程——ANSYS》课程的教学工作，具有丰富的教学经验；同时作者也使用 ANSYS 软件进行科研、设计工作，完成了许多实际工程问题的仿真计算，具有深厚的有限元理论背景，对 ANSYS 软件的使用也有较深的造诣。参加编写和录入工作的还有张荣、金向阳、于岩磊、程翔、刘一志、牛瑞涛、王兆敏、马胜强、李小乐、徐一轩、周松官、于舒春等，在此一并表示深深的感谢。此外，还要感谢电子工业出版社编辑人员的大力支持，正是他们辛勤的劳动和辛苦的付出，才使得本书能够在第一时间出版。对于在创作过程中一如既往给予关心支持的亲密爱人表示最真挚的感谢。

由于时间仓促且作者的水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请专家和广大读者批评指正，同时也欢迎业内人士来电来函共同探讨。

目 录

第 1 部分 ANSYS 基础	1
第 1 章 ANSYS 12.0 结构有限元分析概述	2
1.1 ANSYS 12.0 软件介绍	2
1.1.1 ANSYS 发展过程	3
1.1.2 ANSYS 软件功能介绍	3
1.1.3 ANSYS 12.0 的创新之处	6
1.2 ANSYS 12.0 的启动与退出	9
1.2.1 ANSYS 12.0 的启动	9
1.2.2 ANSYS 12.0 的退出	11
1.3 ANSYS 12.0 操作界面与常用菜单	12
1.3.1 ANSYS 12.0 操作界面及输出窗口	12
1.3.2 ANSYS 12.0 应用菜单	13
1.3.3 ANSYS 12.0 主菜单	13
1.3.4 ANSYS 12.0 其他窗口	14
1.3.5 ANSYS 12.0 对话框	14
1.3.6 ANSYS 12.0 帮助菜单	14
1.4 ANSYS 12.0 文件系统与文件操作	16
1.4.1 ANSYS 文件类型	16
1.4.2 ANSYS 文件的存储与恢复	19
1.4.3 读入 ANSYS 文件	19
1.4.4 写出 ANSYS 文件	20
1.4.5 导入导出几何文件	21
1.5 ANSYS 12.0 结构有限元分析	21
1.5.1 有限元分析的基本思想	21
1.5.2 ANSYS 12.0 结构有限元分析概述	22
1.5.3 ANSYS 12.0 结构有限元分析过程	22
1.6 ANSYS 结构有限元分析初体验：两杆桁架静力分析	25
1.6.1 问题描述与分析	25
1.6.2 求解过程	26
1.7 小结	34
第 2 章 几何建模与网格划分	35
2.1 有限元模型建立概述	35
2.1.1 典型步骤	35
2.1.2 基本方法	36
2.2 ANSYS 坐标系与工作平面	37
2.2.1 坐标系及操作	37
2.2.2 工作平面及使用	41
2.3 自底向上建模	44
2.3.1 定义关键点及操作	45
2.3.2 定义线及操作	46
2.3.3 定义面及操作	47
2.3.4 定义体及操作	48
2.4 自顶向下建模	48
2.4.1 面对象的建立	48



2.4.2	体对象的建立	51
2.5	布尔运算与模型修改	54
2.5.1	布尔运算	54
2.5.2	模型修改	56
2.6	网格属性与划分控制	58
2.6.1	定义单元类型及属性	58
2.6.2	网格划分工具	59
2.6.3	Smartsize 网格划分控制	61
2.6.4	尺寸与形状控制	62
2.7	自由网格与映射网格	64
2.7.1	自由网格划分	65
2.7.2	映射网格划分	66
2.8	小结	69
第 3 章	施加载荷与求解过程	70
3.1	载荷与载荷步	70
3.1.1	载荷的分类	70
3.1.2	载荷步、子步与平衡迭代	71
3.1.3	跟踪中时间的作用	72
3.1.4	阶跃载荷与斜坡载荷	72
3.2	载荷的施加	73
3.2.1	位移约束	73
3.2.2	集中载荷	79
3.2.3	表面载荷	82
3.2.4	体载荷	87
3.3	载荷步选项与多步载荷的创建	89
3.3.1	载荷步选项	89
3.3.2	创建多载荷步	91
3.4	求解	92
3.4.1	求解器选择	93
3.4.2	求解	94
3.5	小结	97
第 4 章	结果后处理	98
4.1	后处理求解器简介	98
4.2	通用后处理器 (POST1)	99
4.2.1	图形显示结果	100
4.2.2	单元表	106
4.2.3	列表显示结果	107
4.2.4	路径操作	110
4.2.5	动画显示结果	113
4.2.6	载荷工况	115
4.2.7	通用后处理器的其他应用	117
4.3	时间历程后处理器 (POST26)	119
4.3.1	变量定义与存储	120
4.3.2	变量操作与查看	122
4.3.3	结果图形显示与列表	123
4.4	小结	127
第 5 章	APDL 编程语言	128
5.1	APDL 语言概述	128
5.2	参数与变量参数的用法	129
5.2.1	参数与变量参数的命名规则	129
5.2.2	变量参数的使用方法	130
5.3	数组参数的用法	139
5.3.1	数组参数概述	139



5.3.2	数组参数的定义	140
5.3.3	数组参数的赋值	141
5.3.4	数组参数的运算	147
5.3.5	矢量和矩阵运算设置	152
5.4	APDL 程序结构	153
5.4.1	子程序调用（宏嵌套）	154
5.4.2	无条件分支*GO	154
5.4.3	条件分支*IF	155
5.4.4	重复执行一个命令*REPEAT	156
5.4.5	循环命令*DO	157
5.4.6	控制函数列表	157
5.5	宏文件	158
5.5.1	宏的创建	159
5.5.2	宏的使用	161
5.5.3	局部变量	163
5.6	小结	164
第 2 部分	ANSYS 结构有限元分析基本过程	165
第 6 章	ANSYS 杆系结构有限元分析	166
6.1	杆系结构有限元分析基本过程	166
6.1.1	基本假定	167
6.1.2	单元刚度矩阵	167
6.1.3	结构总刚度矩阵	169
6.1.4	边界条件	169
6.1.5	杆件内力	169
6.2	ANSYS 中提供的杆单元简介	169
6.2.1	LINK1 单元特性简介	170
6.2.2	LINK8 单元特性简介	172
6.2.3	LINK10 单元特性简介	173
6.3	杆系结构有限元分析实例详解 1：传输塔架的静力分析	175
6.3.1	问题描述与分析	175
6.3.2	求解过程	176
6.4	杆系结构有限元分析实例详解 2：立体桁架的静力分析	188
6.4.1	问题描述与分析	188
6.4.2	求解过程	189
6.4.3	命令流	201
6.5	小结	205
第 7 章	ANSYS 梁系结构有限元分析	206
7.1	梁系结构有限元分析基本过程	206
7.1.1	基本假定	206
7.1.2	单元刚度矩阵	206
7.1.3	结构总体刚度矩阵	208
7.1.4	边界条件及求解	208
7.1.5	空间梁系结构的单元刚度矩阵及坐标变换矩阵	209
7.2	ANSYS 中提供的梁单元简介	209
7.2.1	BEAM3 单元特性简介	210
7.2.2	BEAM4 单元特性简介	213
7.2.3	BEAM188 和 BEAM189 单元特性简介	219
7.3	梁系结构有限元分析实例详解 1：多跨连续梁静力分析	219
7.3.1	问题描述与分析	220
7.3.2	求解过程	220
7.3.3	命令流	236
7.4	梁系结构有限元分析实例详解 2：门式钢架静力分析	238
7.4.1	问题描述与分析	238



7.4.2	求解过程	238
7.4.3	命令流	253
7.5	小结	255
第 8 章	ANSYS 板壳结构有限元分析	256
8.1	板壳结构有限元分析基本过程	256
8.1.1	弹性平面问题有限元分析基本思想	256
8.1.2	平面问题的离散化过程	257
8.1.3	单元刚度分析和结构整体分析	258
8.2	ANSYS 中提供的板壳单元简介	258
8.2.1	PLANE42 单元特性简介	258
8.2.2	PLANE82 单元特性简介	261
8.2.3	SHELL63 单元特性简介	262
8.2.4	SHELL93 单元特性简介	262
8.3	板结构有限元分析实例详解 1: 带孔平板结构静力分析	265
8.3.1	问题描述与分析	265
8.3.2	求解过程	265
8.3.3	命令流	277
8.4	壳结构有限元分析实例详解 2: 混凝土圆柱壳结构静力分析	277
8.4.1	问题描述与分析	277
8.4.2	求解过程	278
8.4.3	命令流	290
8.5	小结	291
第 9 章	ANSYS 实体结构有限元分析	292
9.1	实体结构有限元分析基本过程	292
9.1.1	网格划分	292
9.1.2	单元分析	293
9.1.3	整体分析	293
9.2	ANSYS 中提供的实体单元简介	294
9.2.1	SOLID45 单元特性简介	294
9.2.2	SOLID65 单元特性简介	294
9.2.3	SOLID92 单元特性简介	295
9.3	实体结构有限元分析实例详解 1: 立体钢架的静力分析	296
9.3.1	问题描述与分析	296
9.3.2	求解过程	297
9.4	实体结构有限元分析实例详解 2: 轴承座的静力分析	313
9.4.1	问题描述与分析	313
9.4.2	求解过程	314
9.5	小结	336
第 3 部分	ANSYS 高级分析实例详解	337
第 10 章	ANSYS 结构动力学分析	338
10.1	结构动力学分析概述	338
10.2	模态分析及实例详解	339
10.2.1	模态分析理论的基本假设	339
10.2.2	模态分析方法	339
10.2.3	模态分析过程	340
10.2.4	模态分析实例详解: 立体桁架结构模态分析	343
10.3	谐响应分析及实例详解	355
10.3.1	谐响应分析的定义及应用	355
10.3.2	谐响应分析方法	356
10.3.3	谐响应分析步骤	357
10.3.4	谐响应分析实例详解: 两自由度系统谐响应分析	359
10.4	瞬态分析及实例详解	367



10.4.1	瞬态分析的含义和应用	367
10.4.2	瞬态分析求解方法	368
10.4.3	瞬态分析求解步骤	369
10.4.4	瞬态分析实例：移动载荷作用下斜拉悬臂梁结构的瞬态响应分析	370
10.5	谱分析及实例详解	377
10.5.1	谱分析的含义和应用	377
10.5.2	谱分析的类型及方法	377
10.5.3	响应谱分析	378
10.5.4	谱分析实例：地震位移谱作用下三角平台结构响应分析	380
10.6	小结	389
第 11 章	ANSYS 结构非线性分析	390
11.1	结构非线性分析的基本过程	390
11.1.1	结构非线性分析概述	390
11.1.2	几何非线性	391
11.1.3	材料非线性	391
11.1.4	状态非线性	391
11.1.5	非线性分析在 ANSYS 中的实现	392
11.1.6	非线性分析的基本过程	393
11.2	几何非线性有限元分析实例详解 1：细长杆失稳分析	396
11.2.1	问题描述	396
11.2.2	问题分析	396
11.2.3	求解步骤	397
11.2.4	命令流	406
11.3	材料非线性有限元分析实例详解：橡胶圆筒受压分析	407
11.3.1	问题描述	408
11.3.2	问题分析	408
11.3.3	求解步骤	408
11.3.4	命令流	417
11.4	小结	418
第 12 章	ANSYS 结构稳定性分析	419
12.1	结构稳定性分析的基本概念	419
12.1.1	特征值屈曲分析	419
12.1.2	非线性屈曲分析	420
12.2	实例详解 1：悬臂梁受压线性屈曲分析	420
12.2.1	问题描述与分析	420
12.2.2	求解过程（GUI 方法）	421
12.2.3	命令流	429
12.3	实例详解 2：复合材料圆柱壳非线性屈曲分析	430
12.3.1	问题描述与分析	430
12.3.2	求解过程（GUI 方法）	430
12.3.3	命令流	440
12.4	小结	442
第 4 部分	ANSYS 工程应用实战演练	443
第 13 章	ANSYS 在复合材料结构中的应用	444
13.1	ANSYS 中提供的复合材料单元简介	444
13.1.1	SHELL99——线性层状结构壳单元	444
13.1.2	SHELL91——非线性层状结构壳单元	444
13.1.3	SHELL181——有限应变壳单元	445
13.1.4	SOLID46——三维层状结构体单元	445
13.1.5	SOLID191——层状结构体单元	445
13.1.6	其他可用于复合材料分析的单元	445
13.2	复合材料结构有限元分析基本过程	446



13.2.1	定义材料的叠层结构	446
13.2.2	定义失效准则	449
13.2.3	建模和后处理规则	449
13.3	复合材料结构分析实例详解 1: 复合材料梁弯曲分析	451
13.3.1	问题描述与分析	451
13.3.2	GUI 图形化求解过程	452
13.3.3	APDL 命令流求解过程	462
13.4	复合材料结构分析实例详解 2: 复合材料四边简支板模态分析	464
13.4.1	问题描述与分析	464
13.4.2	GUI 图形化求解过程	465
13.4.3	命令流	474
13.5	小结	475
第 14 章	ANSYS 在机械工程中的应用	476
14.1	有限元分析实例详解 1: 扳手的静力分析	477
14.1.1	问题描述与分析	477
14.1.2	求解过程	477
14.1.3	命令流	487
14.2	有限元分析实例详解 2: 壳体零件的静力分析	489
14.2.1	问题描述与分析	490
14.2.2	求解过程	490
14.3	有限元分析实例详解 3: 支架零件模态分析	495
14.3.1	问题描述与分析	495
14.3.2	求解过程	496
14.4	有限元分析实例详解 4: 电机支架的拓扑结构优化设计	502
14.4.1	问题描述与分析	502
14.4.2	电机支架拓扑结构优化设计	502
14.4.3	优化后电机支架的静力分析	506
14.5	小结	511
第 15 章	ANSYS 在土木工程中的应用	512
15.1	实例详解 1: 椭圆型双层网壳结构静力分析	512
15.1.1	问题描述与分析	512
15.1.2	求解过程	513
15.1.3	命令流	522
15.2	实例详解 2: 空间张弦梁结构设计分析	525
15.2.1	问题描述与分析	525
15.2.2	求解过程	525
15.2.3	命令流	539
15.3	实例详解 3: 空腹梁楼盖组合结构模态分析	544
15.3.1	问题描述与分析	544
15.3.2	求解过程	544
15.3.3	命令流	553
15.4	实例详解 4: 悬链面薄膜结构找形分析	555
15.4.1	问题描述与分析	556
15.4.2	求解过程	558
15.4.3	命令流	566
15.5	小结	567
附录 A	ANSYS 结构分析常用命令参考	568
附录 B	ANSYS 结构分析常用单元总结	586
参考文献		587



Part

第 1 部分 ANSYS 基础

第 1 章 ANSYS 12.0 结构有限元分析概述

第 2 章 几何建模与网格划分

第 3 章 施加载荷与求解过程

第 4 章 结果后处理

第 5 章 APDL 编程语言



第 1 章 ANSYS 12.0 结构有限元分析概述

本章包括

- ◆ ANSYS 12.0 软件介绍
- ◆ ANSYS 12.0 的启动与退出
- ◆ ANSYS 12.0 操作界面与常用菜单
- ◆ ANSYS 12.0 文件系统与文件操作
- ◆ ANSYS 12.0 结构有限元分析
- ◆ ANSYS 初体验：两杆桁架静力分析

有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 的基本概念是用较简单的问题代替复杂问题, 然后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成, 对每个单元假定一个合适的 (较简单的) 近似解, 然后推导求解这个域满足的总的条件 (如结构的平衡条件), 从而得到问题的解。因为实际问题被较简单的问题所代替, 所以这个解不是准确解, 而是近似解。由于大多数实际问题难以得到准确解, 而有限元分析不仅计算精度高, 而且能适应各种复杂形状, 因而成为了行之有效的工程分析手段。国际上著名的通用有限元软件有几十种, 常用的有 ANSYS、NASTRAN、SAP、ADINA 和 ALGOR 等。

ANSYS 公司是世界著名的 CAE 技术公司, 它由匹兹堡大学教授、世界著名的力学分析专家 John Swanson 博士创建于 1970 年, 30 多年来始终以有限元数值模拟领导者的身份为广大工程分析与工程验证用户服务。ANSYS 软件是目前国际上最著名的大型通用有限元分析软件, 经过 30 多年的发展, 已形成融结构、热、流体、电磁、声学及多物理场耦合为一体的大型通用有限元分析软件。作为通用大型商业软件, 它以极高的性能价格比和无可比拟的解题深广度, 广泛应用于航空航天、石油、化工、汽车、造船、铁道、电子、机械制造、地矿能源、水利、核能、生物、医学、土木工程、轻工、一般工业及科学研究等各个领域, 极强的分析功能覆盖了几乎所有的工程问题。作为世界最具权威的有限元产品和工业化分析标准, 目前几乎所有的 CAD/CAE/CAM 软件都竞相开发了与 ANSYS 的专用接口, 以实现数据的共享和交换, 如 Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS、AutoCAD 等。ANSYS 软件在 Linux 和 Windows 下均有版本, 并同时有 32 位和 64 位版本。目前最新的版本为 12.0。

本章将概括性地介绍 ANSYS 的特点和功能, 并对 ANSYS 的运行环境、工作环境及文件系统进行详细的介绍, 最后对 ANSYS 的有限元分析过程进行讲解, 并以一个简单的两杆桁架为例介绍具体的操作过程。通过本章的学习, 读者可以掌握 ANSYS 的基本知识, 熟悉 ANSYS 的工作环境和文件系统的一般操作, 并能了解 ANSYS 有限元分析的一般步骤。

1.1 ANSYS 12.0 软件介绍

ANSYS 软件主要包括 3 个部分: 前处理模块、分析计算模块和后处理模块。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具, 用户可以方便地构造有限元模型; 分析计算模块包括结构



分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力；后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。软件提供了近 200 种单元类型和丰富的材料数据库，用来模拟工程中的各种结构和材料。下面对 ANSYS 12.0 的发展过程、主要功能和创新之处进行介绍。

1.1.1 ANSYS 发展过程

ANSYS 公司于 1970 年成立，是由匹兹堡大学的 John Swanson 博士创建的，其总部位于美国宾州的匹兹堡，在全球拥有 40 多个代理，是世界 CAE 行业最大的公司。ANSYS 公司重点开发开放、灵活的，对设计直接进行仿真的解决方案，提供从概念设计到最终测试产品研发全过程的统一平台，同时追求快速、高效和成本意识的产品开发。公司和其全球网络的渠道合作伙伴为客户提供销售、培训和技术支持一体化服务。2006 年 2 月 16 日，ANSYS 公司宣布收购 Fluent 软件，以加强 ANSYS 仿真解决方案的广泛性、功能性、易用性和协作性。

1.1.2 ANSYS 软件功能介绍

ANSYS 12.0 软件主要包括前处理模块、分析计算模块和后处理模块 3 个部分。启动 ANSYS 后，进入 ANSYS 图形用户界面，从主菜单 Main Menu 可以进入各处理模块：通用前处理模块 PREP7、求解模块 Solution、通用后处理模块 POST1 和时间历程后处理模块 POST26。下面分别对各模块进行介绍。

1.1.2.1 前处理模块 PREP7

选择主菜单 Main Menu 中的 Preprocessor 选项，进入 ANSYS 的前处理模块。该模块中主要有 3 部分内容：参数定义、实体建模和网格划分。

◆ 参数定义

ANSYS 软件在建立有限元模型的过程中，首先需要进行相关参数定义，主要包括定义单位制、定义单元类型、定义单元实常数、定义材料模型和材料特性参数、定义几何参数等。在定义单位制时应注意，除磁场分析外，ANSYS 软件可以使用任意一种单位制，但一定要保证单位制的统一。在建立有限元模型或对实体模型进行网格划分之前，必须定义相应的单元类型，而单元实常数的确定也依赖于单元类型的特性。

◆ 实体建模

ANSYS 程序提供了两种实体建模方法：自顶向下与自底向上。自顶向下进行实体建模时，用户定义一个模型的最高级图元，如球、棱柱等，称为基元，程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户可利用这些高级图元直接构造几何模型，如二维的圆和矩形以及三维的块、球、锥和柱。无论使用自顶向下还是自底向上方法建模，用户均能使用布尔运算来组合数据集，从而建立一个实体模型。ANSYS 程序提供了完整的布尔运算，如相加、相减、相交、分割、粘结和重叠等。在创建复杂实体模型时，对线、面、体、基元的布尔操作能减少相当可观的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动和复制实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造，切线构造，

通过拖拉与旋转生成面和体，线与面的自动相交运算，自动倒角生成，用于网格划分的硬点的建立、移动、复制和删除。自底向上进行实体建模时，用户从最低级的图元向上构造模型，即用户先定义关键点，然后依次是相关的线、面、体。

◆ 网格划分

ANSYS 程序提供了使用便捷、高质量的对 CAD 模型进行网格划分的功能，包括 4 种网格划分方法：延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划分。延伸网格划分可将一个二维网格延伸成一个三维网格。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分，然后选择合适的单元属性和网格控制，生成映像网格。ANSYS 程序的自由网格划分功能是十分强大的，可对复杂模型直接划分，避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时各部分网格不匹配带来的麻烦。自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后，用户指示程序自动地生成有限元网格，分析、估计网格的离散误差，然后重新定义网格大小，再次分析计算、估计网格的离散误差，直至误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

1.1.2.2 求解模块 Solution

在前处理阶段完成建模以后，用户可以在求解阶段获得分析结果。选择主菜单 Main Menu 中的 Solution 选项，进入 ANSYS 的分析求解模块。在该阶段，用户可以定义分析类型、分析选项、载荷数据和载荷步选项，然后开始有限元求解。ANSYS 软件提供的分析类型如下。

◆ 结构静力分析

用来求解外载荷引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响并不显著的问题。ANSYS 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析，而且可以进行非线性分析，如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触分析等。

◆ 结构动力学分析

结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。与静力分析不同，动力学分析要考虑随时间变化的力载荷以及它对阻尼和惯性的影响。ANSYS 可进行的结构动力学分析类型包括瞬态动力学分析、模态分析、谐波响应分析及随机振动响应分析。

◆ 结构非线性分析

结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例地变化。ANSYS 程序可求解静态和瞬态非线性问题，包括材料非线性、几何非线性和单元非线性 3 种。

◆ 动力学分析

ANSYS 程序可以分析大型三维柔体运动。当运动的积累影响起主要作用时，可使用这些功能分析复杂结构在空间中的运动特性，并确定结构中由此产生的应力、应变和变形。

◆ 热分析

程序可处理热传递的 3 种基本类型：传导、对流和辐射。热传递的 3 种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还具有可以模拟材料固化和熔解过程的分相变分析能力以及模拟热与结构应力之间的热—结构耦合分析能力。

◆ 电磁场分析

主要用于电磁场问题的分析,如电感、电容、磁通量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等。还可用于螺线管、调节器、发电机、变换器、磁体、加速器、电解槽及无损检测装置等的设计和分析领域。

◆ 流体动力学分析

ANSYS 流体单元能进行流体动力学分析,分析类型可以为瞬态或稳态。分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流率。并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。另外,还可以使用三维表面效应单元和热一流管单元模拟结构的流体绕流及对流换热效应。

◆ 声场分析

程序的声学功能研究在含有流体的介质中声波的传播,或分析浸在流体中的固体结构的动态特性。这些功能可用来确定音响话筒的频率响应,研究音乐大厅中的声场强度分布,或预测水对振动船体的阻尼效应。

◆ 压电分析

用于分析二维或三维结构对 AC (交流)、DC (直流)或任意随时间变化的电流或机械载荷的响应。这种分析类型可用于换热器、振荡器、谐振器、麦克风等部件及其他电子设备的结构动态性能分析。可进行 4 种类型的分析:静态分析、模态分析、谐波响应分析和瞬态响应分析。

1.1.2.3 后处理模块 POST1 和 POST26

求解阶段完成之后,用户可以通过后处理模块来观察结果。ANSYS 软件的后处理过程包括两个部分:通用后处理模块 POST1 和时间历程后处理模块 POST26。通过友好的用户界面,可以很容易地获得求解过程的计算结果并对其进行显示。这些结果可以包括位移、温度、应力、应变、速度及热流等,输出形式有图形显示和数据列表两种。

◆ 通用后处理模块 POST1

选择主菜单 Main Menu 中的 General Postpro 选项即可进入通用后处理模块。这个模块能将前面的分析结果以图形形式显示和输出。例如,计算结果(如应力)在模型上的变化情况可用等值线图表示,不同的等值线颜色代表了不同的值(如应力值)。浓淡图则用不同的颜色代表不同的数值区(如应力范围),清晰地反映出计算结果的区域分布情况。POST1 还提供了如误差估计、载荷工况组合、结果数据的计算和路径操作等功能。

◆ 时间历程响应后处理模块 POST26

选择主菜单 Main Menu 中的 TimeHist Postpro 选项即可进入时间历程响应后处理模块。这个模块用于检查在一个时间段或子步历程中的结果,如节点位移、应力或支反力。这些结果可以通过绘制曲线或列表进行查看。绘制一个或多个变量随频率或其他量变化的曲线,有助于形象化地表示分析结果。另外,POST26 还可以进行曲线的代数运算,变量之间可以进行加、减、乘、除运算以产生新的曲线,也可以取绝对值、平方根、对数、指数以及最大和最小值等,还可以对曲线进行微积分运算。

1.1.3 ANSYS 12.0 的创新之处

作为一个大型的 CAE 分析软件, ANSYS 自上个世纪 70 年代诞生以来, 随着计算机和有限元理论的发展, 在各个领域得到了高度的评价和广泛的应用。随着版本的更新, 其分析能力和各项操作功能都得到了更好的完善和发展。ANSYS 12.0 不仅在计算速度上进行了改进, 同时增强了软件的几何处理、网格划分和后处理等能力。此外, 它还将创新的、耳目一新的仿真技术引入了各主要物理学科。这些改进代表仿真驱动产品的发展道路又向前迈出了一步。那么, ANSYS 12.0 到底有哪些新增功能呢? 让我们一睹为快。

1.1.3.1 ANSYS Workbench 2.0

ANSYS Workbench 环境是将仿真过程结合在一起的纽带, 这在 2.0 版本中没有改变。在 ANSYS 12.0 中, 核心应用仍旧与以往类似, 但在项目页面中革新性地引入了项目示意图概念, 来捆绑各核心应用, 如图 1.1 所示。项目示意图的引入扩展了项目页面概念, 这些改进代表了仿真驱动产品研发道路上的一大飞跃。

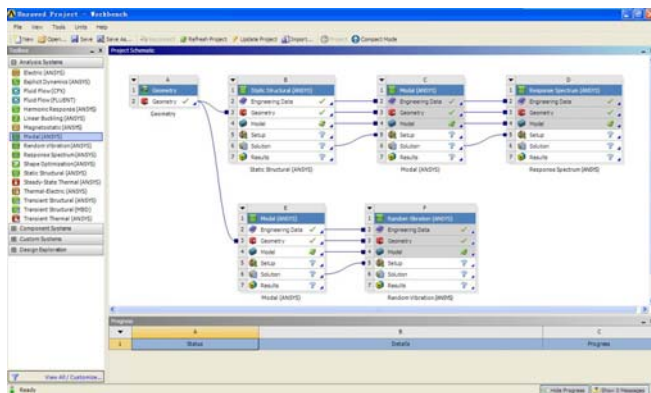


图 1.1 Workbench 项目示意图

复杂的分析, 包括多物理场分析, 都可以通过连接系统来创建。数据相关性通过连接系统一目了然。而单元右侧的状态图标则可清楚指示单元是否已是最新的, 是否需要用户输入或是否需要进行更新——例如, 单元是刚刚完成了网格划分还是已求解结束。

除了可用做集成现有应用程序的框架之外, ANSYS Workbench 2.0 平台还可做应用开发框架, 进而最终提供项目级脚本的编写、报告、用户界面 (UI) 工具包和标准数据界面。这些功能将逐步在本版本及后续版本中实现。在 ANSYS 12.0 中, 工程数据和 ANSYS Design Explorer 不再是相互独立的应用, 两者已通过 UI 工具包重新构建并集成到 ANSYS Workbench 项目窗口中。

ANSYS Workbench 2.0 在工程仿真方面取得了极大进步。在此款革新性软件框架中, 分析人员可充分利用全面、可靠的仿真技术, 包括 CAD 集成、几何修复和网格划分等常见工具。新颖的项目示意图概念可引导用户完成复杂的分析, 不仅能明确显示数据关联性, 还能捕捉过程, 以自动实现后续分析。此外, 凭借其稳固的参数化建模环境, 工程师可结合利用设计优化和统计分析等集成工具更快地找到最佳设计方案。

1.1.3.2 几何与网格划分

ANSYS 在其深厚的知识和经验的基础上, 融合了各种丰富的几何和网格划分技术, 整合后的

几何和网格划分解决方案，使不同的分析应用可以共享几何和网格信息。在 ANSYS 12.0 中，几何接口得到了进一步增强。通过几何接口，用户可以从 CAD 系统中导入更多的数据类型，如用于梁结构建模的线体、附加属性，如颜色和坐标系统，改善了对 CAD 系统中命名选项的支持。对于大模型的前处理，ANSYS 12.0 支持 64 位操作系统，可以对 CAD 零件进行智能有选择性的更新。

ANSYS Workbench 环境中的几何建模功能得到了极大增强，自动化程度更高，灵活性更好，并且几何分析准备任务更为简单易用。此外，ANSYS 12.0 中新增合并、关联和项目功能，表面建模方式更为完善。新增工具可自动检测并修补明显问题，如小边、窄面、洞、缝隙以及尖角。新版本对几何模型的修改和处理速度更快。

ANSYS 12.0 的焦点之一就是为流体动力学提供一个最佳的自动网格划分解决方案。通过添加 GAMBIT 和 TGrid 的多种网格附加功能，用户只需输入很少的参数即可自动生成适合 CFD 的四面体网格。另外，它融合了高级尺寸函数（与 GAMBIT 相似）、棱柱及四面体网格（来自 TGrid）及其他网格划分技术，改进了网格平滑度、网格质量、划分速度、曲率近似功能捕捉、边界分层捕捉等功能。尽管许多功能是出于流体动力学的应用而改进的，但是它们仍然可以用于其他仿真分析应用。例如，用户在执行结构分析时，就可享受自动化和网格质量改善所带来的好处。通过新增的多区域网格划分方法，用户可使用纯六面体来对复杂模型进行网格划分处理，而无须先进行几何分解。例如，用户可通过一次操作对刹车盘进行全六面体网格划分处理，如图 1.2 所示。

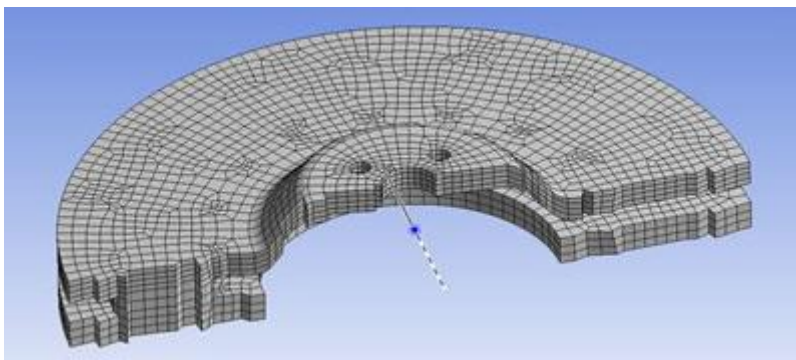


图 1.2 刹车盘的六面体网格划分

1.1.3.3 多物理场

ANSYS 12.0 扩展了 ANSYS 公司在业界领先的综合多物理场解决方案，提供了多项新增功能，并对一些功能作了改进，可解决直接和间接求解多物理场耦合问题。此外，ANSYS Workbench 框架更使得多物理场仿真速度比以往更快。在 12.0 版本中，ANSYS 求解器技术的整合往前迈出了很大一步，它将求解器技术整合在一个统一的仿真环境中，为多场求解提供了更有效的工作流程。

ANSYS 12.0 对分布式稀疏矩阵求解器进行了扩展，以便为共享和分布式存储器并行环境的复杂非对称矩阵提供支持。这项新增的求解器技术可极大缩减执行某些直接耦合解决方案（包括珀尔帖 Peltier 和塞贝克 Seebeck 效应，以及热弹性力学）所需的时间。此外，ANSYS 12.0 中有一系列新增直接耦合场单元类型，这些新增单元类型可以用来模拟多孔介质内的流动。

ANSYS Workbench 框架支持直接耦合场分析，相关的直接耦合场单元（SOLID226 和 SOLID227）在 ANSYS 12.0 中支持热电耦合。其中，针对热电耦合新增了一个分析系统，支持与温度相关的材料属性和高级热电效应（包括珀尔帖 Peltier 和塞贝克 Seebeck 效应）方面的焦耳热

分析。此项新技术的应用领域包括集成电路和电子布线、热电致冷器和热电发电器的焦耳热分析。

流固耦合 (Fluid Structure Interaction, FSI) 的主要改进之一是新增了一个固体浸入式 FSI 解决方案。借此解决方案, 工程师可对刚性体浸入式流固耦合进行模拟。ANSYS 12.0 中流固耦合的另一项新增功能是, FLUID136 可对涉及薄流体膜的瞬态非线性 FSI 应用进行非线性雷诺挤压膜方程求解。除此之外, 12.0 版本还提供了另一项激动人心的 FSI 功能, 即使用 ANSYS FLUENT 软件作为 CFD 求解器, 来执行单向流固耦合计算。这项功能基于 ANSYS CFXPost, 实现了 ANSYS FLUENT 和 ANSYS Mechanical 产品之间表面温度或表面力的单向载荷传递。

1.1.3.4 结构力学

在结构应用中的驱动工程设计过程中, ANSYS 12.0 的功能得到了很大的改进。许多新增功能及工具整合到 ANSYS Workbench 平台中, 以缩短整体求解时间。另外, 在单元、材料、接触、求解性能、线性动力学、刚体动力学及柔体动力学上也集中进行了改进。

ANSYS 12.0 中最引人注目的新单元是用于超弹性或成型应用中模拟复杂几何的 4 节点四面体单元。它缩短了从几何到求解的分析时间, 同时保证了求解的精确度。材料方面, ANSYS 12.0 在原有众多选择的基础上引入了几个新材料, 如 Gurson 材料, 可用于模拟聚合体及聚合体复合的材料等。

装配体分析在仿真中越来越重要, ANSYS 12.0 增强了高级接触属性, 开发了许多附加接触模拟特征, 包括新增接触算法、自动去除过约束、接触对修整等功能, 在求解接触问题时得到了极大的改进, 缩短了求解时间, 加快了求解速度。

ANSYS 12.0 改善了求解器性能, 新增了一个模态求解器, 称为 SuperNODE, 用于求解大模型 (超过 100 万自由度) 的大数量振型 (几百阶振型)。并行求解器 DANSYS 的功能也进行了改进, 支持低频电磁分析、高频电磁分析、PSTRESS、PSOLVE 及循环对称分析, 可以有效地解决电磁问题、转子动力学问题及循环对称和应力强化问题, 节约求解时间。

ANSYS 12.0 的 ANSYS Structural、Mechanical 及 Multiphysics 在刚体动力学及柔体动力学功能上进行了改进, 可以快速处理机构问题。对数据及过程的众多改进增强了 ANSYS 刚体动力学仿真的易用性。

1.1.3.5 流体动力学

ANSYS 12.0 将流体产品完全整合进 ANSYS Workbench 环境, 以在该环境下进行仿真工作流程的管理。用户可以采用 ANSYS CFX 或 ANSYS FLUENT 软件来创建、连接、重复使用系统, 以完成自动参数化分析, 然后进行多物理场无缝管理仿真。

ANSYS 一直坚持不懈地致力于改进求解器速度, 以使所有用户从中获益。涉及多个行业的一系列案例显示, ANSYS CFX 和 ANSYS FLUENT 求解器速度已经提高了 10% 至 20%, 甚至更多。ANSYS FLUENT 通过显式松弛增加了密度基隐式求解器的稳健性, 采用递推映射方法选项来提高稳定性 (耦合压力基求解器), 极大地增强了求解器的性能。另外, 程序的易用性在很多方面得到了提高。ANSYS FLUENT 采用单视框用户图形界面, 以便和 Workbench 中的其他分析应用保持一致, 同时改进了 TUI 日志的鲁棒性, 扩展了 Case Check 的推荐功能, 在用户界面发展史上又前进了一步。ANSYS CFX 软件界面风格上的主要改进在于增加了图形用户界面 (GUI)。ANSYS 12.0 的一个新功能允许用户定制界面外观, 包括创建附加输入面板。用户定制面板通过 GUI 布局和

必要的输入进行用户控制，将常用操作及基本过程封装在一起。

1.1.3.6 仿真过程及数据管理

在如今的全球化环境中，仿真和设计不断整合，高效合作和交流成为产品开发中必不可少的一部分。ANSYS 工程知识管理 (Engineering Knowledge Manager, EKM) 解决方案旨在解决仿真和 CAE 界的仿真过程和数据管理 (Simulation Process and Data Management, SPDM) 难题。ANSYS EKM 的内容包括如何更好地管理、共享、重复使用仿真数据以及如何更好地捕捉和重复使用仿真结果等工程专业技术。ANSYS EKM 共有 3 个版本: ANSYS EKM Desktop、ANSYS EKM Workgroup 和 ANSYS EKM Enterprise。这 3 个版本分别面向个人用户、工作组及企业级用户。ANSYS EKM Desktop 是 ANSYS EKM 产品中的单用户、局部环境版本。作为 ANSYS 12.0 的一部分，它已经集成于 ANSYS Workbench 环境中，通过提供数据搜索、修补和报告特性，解决已有仿真任务的重复使用，满足单个用户的数据管理需求，提高生产力和效率。

1.1.3.7 显式动力学

ANSYS 12.0 在显式动力学领域倾注了大量的精力，如附加了新产品，使该技术对于无使用经验的用户也易于使用。另外，增强了 ANSYS LS-DYNA 和 ANSYS AUTODYN 产品功能，为用户提供更大的便利。ANSYS 12.0 还首次引入了 ANSYS Explicit STR 软件，它基于 ANSYS AUTODYN 产品的拉氏算子部分，是 ANSYS Workbench 界面的第一个本地显式软件。对于那些需要对固体、液体、气体及其相互作用进行非线性动态仿真的用户，该项技术将非常有用。对于使用过 ANSYS Workbench 的用户，会发现自己其实已经掌握了 ANSYS Explicit STR 的大多数操作方法。

1.1.3.8 电磁学

ANSYS 的专业开发团队将世界一流的 Ansoft 电子设计分析 (Electronic Design Analysis, EDA) 产品集成到 ANSYS 产品组合中，对 ANSYS Emag 模块进行了增强。客户可感觉到 12.0 版本中的电磁学性能有明显提高和扩展。在 12.0 版本的 ANSYS Emag 软件中，针对低频电磁仿真新增了一系列三维固体单元。而对于静磁场、准静态时谐磁场和瞬态准静态磁场建模，则提供了 SOLID236 和 SOLID237 固体单元。用户可将此新增单元技术应用于大多数低频电磁案例中，如电动机、螺线管、电磁铁和发电机等电磁设备。

1.2 ANSYS 12.0 的启动与退出

下面介绍 ANSYS 12.0 的启动和退出，以及一些注意事项。

1.2.1 ANSYS 12.0 的启动

ANSYS 12.0 的启动方式如下。

选择“开始”→“程序”→ANSYS 12.0→ANSYS 12.0 Product Launcher 命令，启动 ANSYS 12.0，出现如图 1.3 所示的 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

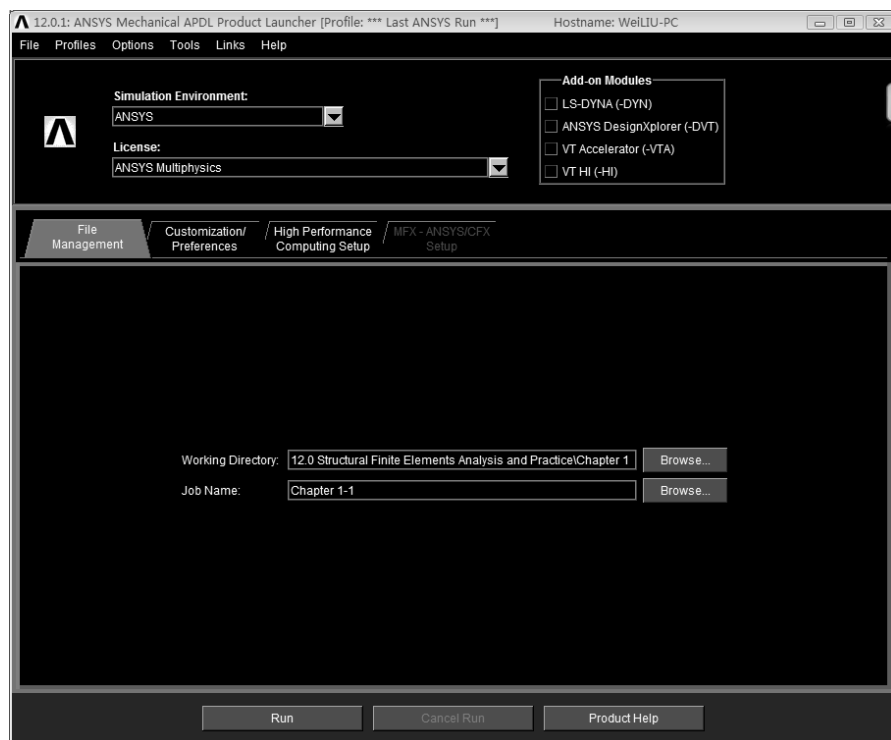


图 1.3 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口

step 1 根据使用要求在 Simulation Environment 下拉列表框中选择模拟环境，一般选择 ANSYS。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS 12.0 产品，通常选择 ANSYS Multiphysics，如图 1.3 所示。

step 2 选择工作目录，设置工作文件名。单击 File Management 选项卡，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录 C:\ANSYS 12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 1，也可通过单击 Browse 按钮进行选择，此目录一旦选定，ANSYS 12.0 的所有生成文件都将自动写在该目录下；在 Job Name 输入栏中输入工作文件名，也可通过单击 Browse 按钮选择工作文件名，ANSYS 12.0 的默认工作文件名为 file，读者可以根据自己所分析的问题进行更改，如图 1.3 所示。



根据前面的设置，第 1 章的实例保存在 C:\ANSYS 12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 1 目录下，第一个实例被命名为 Chapter 1-1，后面的实例依此类推。以后各章的实例保存在相应的章节目录中，如第 6 章内容保存在 C:\ANSYS 12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 6 目录中，文件命名规则相同。

step 3 设置 ANSYS 12.0 工作空间和数据库的大小。单击 Customization/Preferences 选项卡，在 Memory 栏中设置 ANSYS 12.0 的工作空间和数据库的大小。在 Graphics Device Name 下拉列表框中设置图形设备驱动，ANSYS 12.0 程序提供了 3 种不同的图形设备驱动，分别为 win32、win32c 和 3D 选项。win32 选项适用于大多数的图形显示，在后处理过程中

提供 9 种颜色的等值线；win32c 选项能提供 128 种颜色的区别；3D 选项则对三维图形的显示具有良好的效果。如果计算机配置了 3D 卡，则应选 3D 选项。一般应用中，选择默认设置即可，如图 1.4 所示。

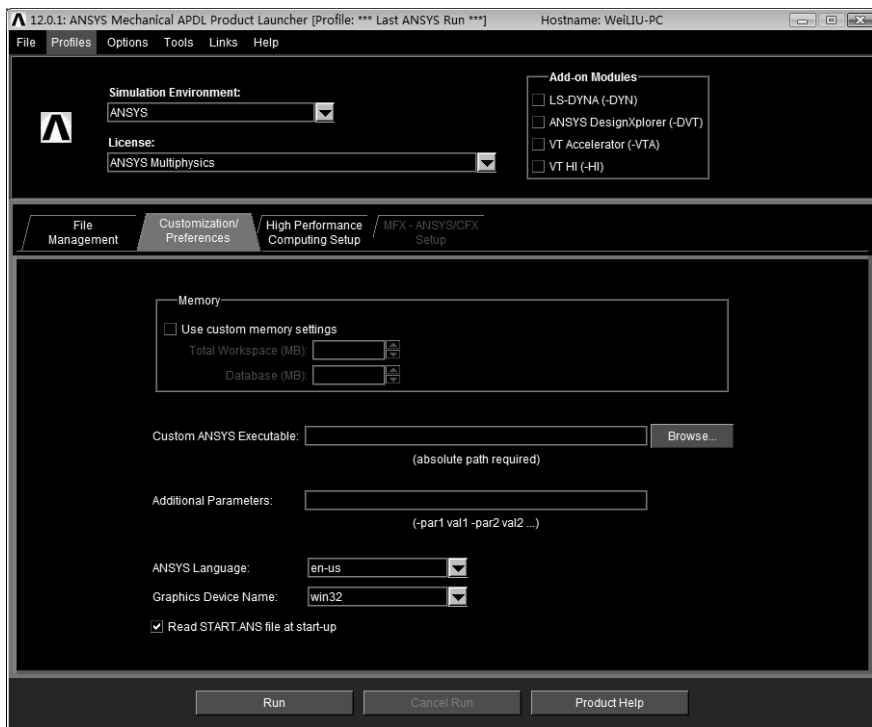


图 1.4 Customization/Preferences 选项卡

step 4

以上参数设置完毕之后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。



设置完成并运行 ANSYS 程序后可关闭 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，不影响主程序的运行。当然，为了使下一个实例的操作方便，也可不关闭该窗口。

1.2.2 ANSYS 12.0 的退出

退出 ANSYS 12.0 的方法有如下 3 种。

- ◆ 从工具条退出。在 ANSYS Toolbar 工具条中单击 QUIT 按钮。
- ◆ 从应用菜单退出。选择 Utility Menu→File→Exit 命令。
- ◆ 在命令输入窗口中键入 “ / Exit ” 命令。

当执行上述任何一种操作时，系统会弹出如图 1.5 所示的对话框，并提示退出前要选取的操作，各操作的具体含义如下（从上到下顺序）。

- ◆ **Save Geom+Loads:** 退出 ANSYS 时存储几何与载荷数据。
- ◆ **Save Geo+Ld+Solu:** 退出 ANSYS 时存储几何、载荷与求解结果。

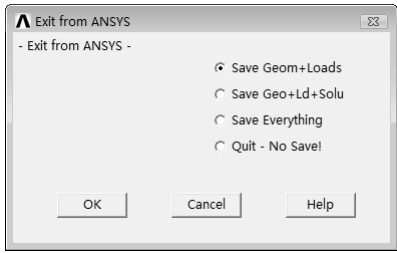


图 1.5 ANSYS 12.0 退出对话框

- ◆ **Save Everything:** 退出 ANSYS 时存储所有数据。
- ◆ **Quit-No Save!:** 退出 ANSYS 时不存储任何数据。

在该对话框中选择所需的单选按钮，如果计算机存储空间允许，建议选择 Save Everything 单选按钮，然后单击 OK 按钮退出 ANSYS 12.0。

1.3 ANSYS 12.0 操作界面与常用菜单

启动 ANSYS 12.0 后，进入 ANSYS 12.0 操作界面，下面分别介绍其组成及常用菜单项。

1.3.1 ANSYS 12.0 操作界面及输出窗口

启动 ANSYS 12.0 程序后，打开如图 1.6 所示的交互界面主环境和图 1.7 所示的信息输出窗口。输出窗口（Output Window）的主要作用是显示 ANSYS 程序运行过程中的输出文本信息。该窗口一般位于交互界面主环境窗口的后面，需要查看时单击操作系统状态栏上的 Output Window 图标 ANSYS 12.0... 就可将其提升到台前。

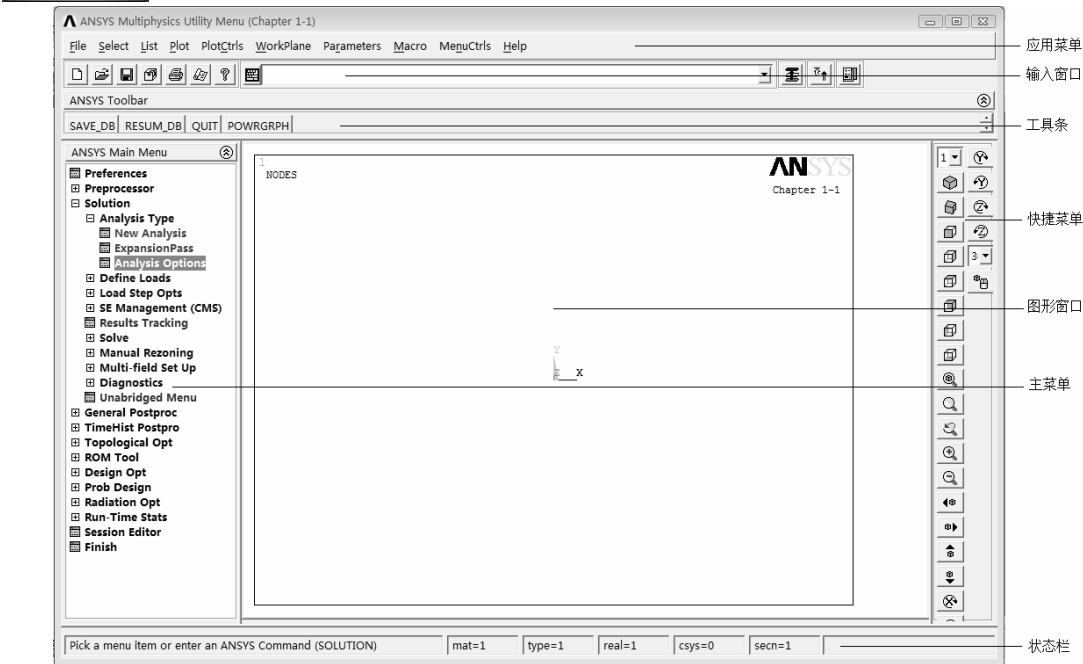


图 1.6 ANSYS 12.0 图形操作界面

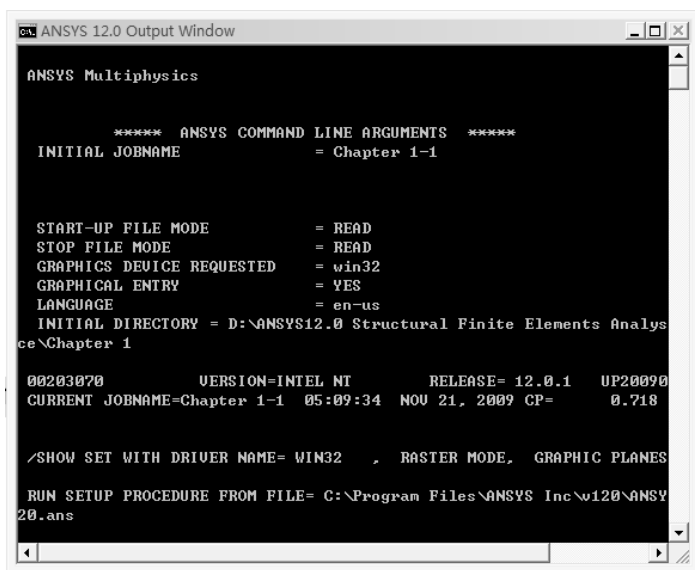


图 1.7 ANSYS 12.0 输出窗口：Output Window

从图 1.6 可以看出，ANSYS 交互图形界面环境由多个子区域的主窗口和输出窗口组成，包含应用菜单、主菜单、输入窗口、工具条、图形窗口、快捷菜单和状态栏 7 个部分。下面着重介绍应用菜单、主菜单和其他窗口等用户经常交互使用的功能模块。

1.3.2 ANSYS 12.0 应用菜单

应用菜单 (Utility Menu) 如图 1.8 所示，其中包含各种应用命令，如文件 (File)、选择 (Select)、列表 (List)、图形显示 (Plot)、图形控制 (PlotCtrls)、工作平面 (WorkPlane)、参数设置 (Parameters)、宏命令 (Macro)、菜单设置 (MenuCtrls) 及帮助 (Help) 等。该菜单为下拉式菜单，单击某菜单项，可以直接完成某一功能或弹出相应的对话框。读者可以自己尝试逐个单击各菜单项，对其进行大概的了解，更详细的说明可以参阅 ANSYS 自带的帮助文件。



图 1.8 ANSYS 12.0 应用菜单

1.3.3 ANSYS 12.0 主菜单

主菜单 (Main Menu) 位于主窗口的左侧，为树形结构，其中包含 ANSYS 有限元分析操作处理菜单，如前处理器 (建立有限元模型)、求解器 (执行各种分析求解)、通用后处理器 (对应时间的完整模型结果处理)、时间历程后处理器 (一定时间范围内某个结果项分析处理) 等主要处理器。另外，还有拓扑优化设计、设计优化、概率设计等专用处理器，如图 1.9 所示。用鼠标单击菜单项可以展开或收起下一级的子菜单项，在进行下一个功能之前，重叠的独立窗口允许用户完成所有的操作。读者可以自己尝试逐个单击各菜单项，对其进行大概的了解，更详细的说明可以参阅 ANSYS 自带的帮助文件。

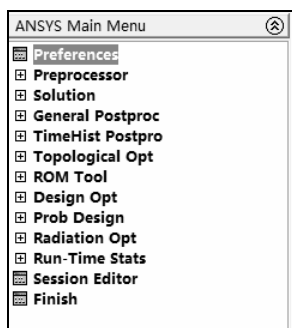




图 1.9 ANSYS 12.0 主菜单

1.3.4 ANSYS 12.0 其他窗口

ANSYS 的主界面还包括如下窗口。

- ◆ **输入窗口 (Input Window)**: 包含 ANSYS 命令输入行、命令提示信息、其他提示信息及下拉式运行命令记录列表等, 可以直接选取下拉式运行命令记录列表中的命令行, 然后双击重新执行该命令行。
- ◆ **图形窗口 (Graphics Window)**: ANSYS 各种图形的输出显示窗口, 如几何图形、节点与单元模型、结果显示等。
- ◆ **状态栏 (Status)**: 显示当前系统的基本状态信息, 包括当前操作提示信息、当前材料号、单元类型号、实常数号、坐标系号和窗口号。
- ◆ **工具条 (Toolbar)**: 包含常用操作缩写按钮, 以方便随时单击执行缩写命令或者宏文件等, 依次为存储 DB (数据库文件)、恢复 DB (数据库文件)、退出 ANSYS 和图形显示模式切换等按钮。
- ◆ **快捷菜单**: 包括新分析、打开分析数据库文件、存储分析数据库文件、弹出 Pan-Zoom-Rotate 图形变换对话框、打印、自动生成报告和打开帮助系统等按钮。还包括窗口号选择、各方向视图、图形放大缩小、平移、旋转、单次旋转角度等按钮。

1.3.5 ANSYS 12.0 对话框

单击主菜单中带  图标的命令和应用菜单中带  图标的命令, 均会弹出对话框。在 ANSYS 12.0 的对话框中一般都会有两个执行按钮, 即 OK 按钮与 Apply 按钮。单击 OK 按钮, 执行操作并直接关闭该对话框; 单击 Apply 按钮, 执行操作但不关闭对话框, 以便进行重复操作, 如图 1.10 所示。

ANSYS 12.0 中有各种各样的对话框, 本节不详细介绍, 在本书的后面章节会结合工程实例进行讲解。

1.3.6 ANSYS 12.0 帮助菜单

ANSYS 12.0 提供了帮助文件系统, 其整体布局及格式较以前版本做了较大改动, 具体界面如图 1.11 所示。

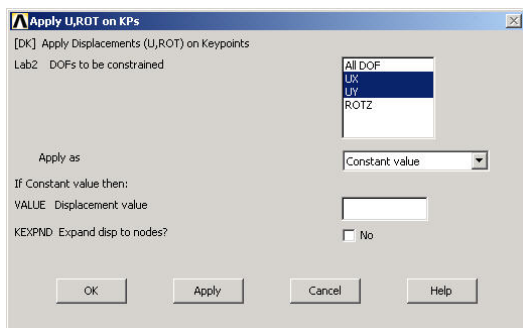


图 1.10 ANSYS 12.0 对话框的执行按钮

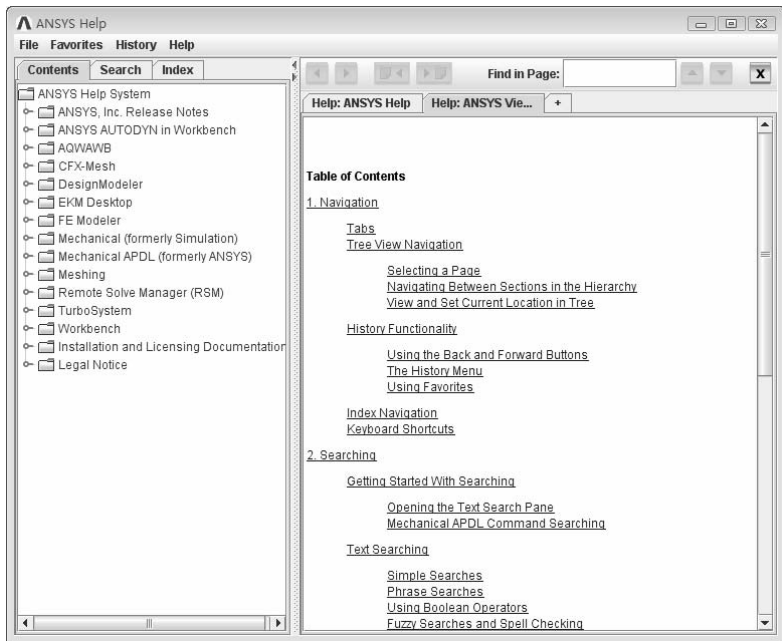


图 1.11 ANSYS 12.0 帮助系统

可以按照下列途径进入帮助系统。

- ◆ 选择“开始”→ANSYS 12.0→Help→ANSYS Help 命令。
- ◆ 选择 Utility Menu→Help→Help Topics 命令。
- ◆ 在任何 ANSYS 对话框中单击 Help 按钮。
- ◆ 在命令输入窗口键入 HELP 命令。

下面对 ANSYS 的帮助系统进行简单介绍。选择 Utility Menu→Help→Help Topics 命令，弹出如图 1.11 所示的 ANSYS 帮助系统，左侧显示目录（Contents）、搜索（Search）和索引（Index）3 个选项卡，用于实现系统信息的导航、相关信息的快速搜索和索引功能，右侧窗口则显示左侧条目定位后的帮助信息内容。可以按照下列方法阅读帮助信息。

- ◆ 使用目录选项卡浏览感兴趣的内容。
- ◆ 使用搜索选项卡从帮助系统中查找指定的单词或短语。
- ◆ 使用索引选项卡快速查找具体的命令、术语和概念等。

- ◆ 使用在线 HTML 形式的帮助信息。



ANSYS 12.0 的帮助文件系统内容是相当丰富的，是很好的 ANSYS 学习资料，建议读者多看，多学，多参考。

1.4 ANSYS 12.0 文件系统与文件操作

ANSYS 应用菜单中的 File 文件操作菜单系统，专门用于对 ANSYS 的各种文件进行操作处理，本节将对其进行简单介绍。

1.4.1 ANSYS 文件类型

ANSYS 文件的形式为 Jobname.EXT，包括工作名和扩展名两部分。ANSYS 文件的工作名一般由用户定义，用于标识不同个体的差异，而扩展名由 ANSYS 程序定义，用于标识 ANSYS 文件的不同类型。典型的 ANSYS 文件有如下几种。

- ◆ **日志文件 (Jobname.LOG)**: 当进入 ANSYS 时系统会打开日志文件。在 ANSYS 中键入的每个命令或在 GUI (图形用户界面) 方式下执行的每个操作都会被复制到日志文件中，当退出 ANSYS 时系统会关闭该文件。使用 /INPUT 命令读取日志文件可以对崩溃的系统或严重的用户错误进行恢复。
- ◆ **数据库文件 (Jobname.DB)**: 数据库文件是 ANSYS 软件中最重要的文件之一，它包含了所有的输入数据 (单元、节点信息、初始条件、边界条件、载荷信息) 和部分结果数据 (通过 POST1 后处理器读取)。
- ◆ **错误文件 (Jobname.ERR)**: 错误文件用于记录 ANSYS 发出的每个错误或警告信息。如果 Jobname.ERR 文件在启动 ANSYS 之前已经存在，那么所有新的警告和错误信息都将追加到这个文件的后面。
- ◆ **输出文件 (Jobname.OUT)**: 输出文件会将 ANSYS 给出的响应捕获至用户执行的每个命令，而且还会记录警告、错误信息和一些结果。
- ◆ **结果文件 (Jobname.RST、Jobname.RTH、Jobname.RMG)**: 存储 ANSYS 计算结果的文件。其中 Jobname.RST 为结构分析结果文件，Jobname.RTH 为热分析结果文件，Jobname.RMG 为电磁分析结果文件。

ANSYS 的数据文件存储格式有两种。

- ◆ **文本文件 (Text)**，如错误信息文件 Jobname.ERR 和日志文件 Jobname.LOG。
- ◆ **二进制文件 (Binary)**，如数据库文件 Jobname.DB、单元矩阵文件 Jobname.EMAT 和结果文件 Jobname.RST。

ANSYS 程序运行产生的文件中，存在以下两种情况。

- ◆ **临时文件**: 这类文件在 ANSYS 运行结束前产生，但在某一时刻会被自动删除。临时文件一般是计算过程中存储某些中间信息的文件，如 ANSYS 虚拟内存页文件 (数据库空间)

Jobname.PAGE 以及旋转单元矩阵文件 Jobname.EROT 等。ANSYS 产生的临时文件如表 1.1 所示。

- ◆ **永久文件：**这类文件在 ANSYS 运行结束后永久保留在计算机的当前工作目录中，这些文件往往是包含有用信息的重要文件，如数据库文件、结果文件等。ANSYS 产生的永久文件如表 1.2 所示。ANSYS 的许多永久文件是向上兼容的，能在 ANSYS 高版本使用的文件在向上兼容一栏中会有一个“Y”标记。

表 1.1 ANSYS 产生的临时文件

文件类型	文件格式	文件名
Jobname.ANO	Text	图形注释命令[/ANNOT]
Jobname.BAT	Text	从批处理输入文件中复制的输入数据 [/BATCH]
Jobname.Don	Text	嵌套层（级）n 的循环命令
Jobname.DSCR	Binary	暂存文件（ANTYPE=2，模态分析）
Jobname.EROT	Binary	旋转单元矩阵文件
Jobname.LSCR	Binary	暂存文件（ANTYPE=4，模态叠加）
Jobname.LV	Binary	子结构生成传递的多个载荷矢量的临时文件
Jobname.MASS	Binary	模态分析的集总质量矩阵（子空间法）
Jobname.MMX	Binary	模态分析的工作矩阵（子空间法）
Jobname.PAGE	Binary	ANSYS 虚拟内存页文件（数据库空间）
Jobname.PCS	Binary	PCG 求解器的暂存文件
Jobname.PCn	Binary	PCG 求解器的暂存文件（n=1~10）
Jobname.SCR	Binary	雅可比共轭梯度求解器的暂时文件
Jobname.SSCR	Binary	子结构生成传递的暂时文件

表 1.2 ANSYS 产生的永久文件

文件类型	文件格式	向上兼容	文件名
Jobname.BDB	Binary	—	最优设计的数据库文件 [OPKEEP]
Jobname.BFIN	Text	—	由 BF 命令写入的体积力插值文件[BFINT]
Jobname.BRFL	Binary	—	最优设计的 FLOTRAN 结果文件 [OPKEEP]
Jobname.BRMG	Binary	—	最优设计的磁场结果文件 [OPKEEP]
Jobname.BRST	Binary	—	最优设计的结构分析结果文件 [OPKEEP]
Jobname.BRTH	Binary	—	最优设计的温度结果文件 [OPKEEP]
Jobname.CBDO	Text	—	由 D 命令写入的自由度插值文件 [CBDOF]
Jobname.CDB	Text	Y	文本格式数据库文件 [CDWRITE]
Jobname.CMAP	Text	—	彩色映像文件
Jobname.CMD	Text	Y	由*CFWRITE 写入的命令文件
Jobname.DB	Binary	Y	数据库文件 [SAVE, /EXIT]
Jobname.DBE	Binary	—	批处理模式中因 VMESH 失败产生的数据库文件
Jobname.DBG	Text	—	FLOTRAN “调试”文件（包括求解信息）

(续表)

文件类型	文件格式	向上兼容	文件名
Jobname.DSUB	Binary	Y	使用结束的超单元 DOF 求解文件
Jobname.ELEM	Text	Y	单元定义文件[EWRITE]
Jobname.EMAT	Binary	Y	单元矩阵文件
Jobname.ERR	Text	—	错误及警告信息文件
Jobname.ESAV	Binary	Y	单元数据存储文件(注: ANSYS 非线性分析产生的 ESAV 文件可能向上不兼容)
Jobname.FATG	Text	—	疲劳数据文件 [FTWRITE]
Jobname.FULL	Binary	—	组集的整体刚度矩阵和质量矩阵文件
Jobname.GRPH	Text	Y	中性图形文件
Jobname.IGES	Text	Y	由 ANSYS 实体模型产生的 IGES 文件 [IGES]
Jobname.LGW	Text	Y	数据库命令记录文件 [LGWRITE]
Jobname.Lnn	Binary	Y	载荷工况文件 [LCWRITE]
Jobname.LOG	Text	Y	命令输入历程文件
Jobname.LOOP	Text	—	优化循环文件
Jobname.MCOM	Text	Y	谱分析中的模式组合命令文件 [MCOMB]
Jobname.MODE	Binary	Y	模态矩阵文件(模态和屈曲分析)
Jobname.MP	Text	Y	材料特性定义文件 [MPWRITE]
Jobname.NODE	Text	Y	节点定义文件 [NWRITE]
Jobname.OPO	Text	—	最终优化循环的 ANSYS 输出文件
Jobname.OPT	Text	—	优化的数据文件
Jobname.OSAV	Binary	—	最终优化循环的 ESAV 文件副本
Jobname.OUT	Text	—	ANSYS 输出文件
Jobname.PARM	Text	Y	参数定义文件[PARSAVE]
Jobname.PFL	Text	—	FLOTRAN 打印输出文件
Jobname.PSD	Binary	—	PSD 文件(模态协方差矩阵等)
Jobname.RDF	Text	—	FLOTRAN 的残留文件[FLDATA, OUTP]
Jobname.RDSP	Binary	—	约化位移文件
Jobname.REDM	Binary	—	约化结构矩阵文件
Jobname.RFL	Binary	Y	FLOTRAN 结果文件
Jobname.RFRQ	Binary	—	约化复合位移文件
Jobname.RMG	Binary	Y	磁场分析的结果文件
Jobname.RST	Binary	Y	结构和耦合场分析的结果文件
Jobname.RSW	Text	—	FLOTRAN “管壁”结果文件
Jobname.RTH	Binary	Y	温度场分析的结果文件
Jobname.RUN	Text	—	FLOTRAN 运行的数据文件
Jobname.SELD	Binary	Y	生成结束的超单元载荷矢量数据文件
Jobname.Snn	Text	Y	载荷步文件(nn 为载荷步号) [LSWRITE]

(续表)

文件类型	文件格式	向上兼容	文件名
Jobname.SORD	Text	—	使用结束的超单元名及编号文件
Jobname.STAT	Text	—	ANSYS 批处理运行状态文件
Jobname.SUB	Binary	Y	在传输阶段产生的超单元矩阵文件
Jobname.TB	Text	Y	超弹性材料常数文件 [*MOONEY]
Jobname.TRI	Binary	—	三角化刚度矩阵文件
Jobname.USUB	Binary	Y	为子结构扩展传递而输入的重新命名 DSUB 文件
Jobname.XBC	Text	—	FLOTRAN 边界条件数据文件
Jobname.XGM	Text	—	FLOTRAN 几何形状数据文件
Jobname.XIC	Text	—	FLOTRAN 初始条件数据文件



为了最大限度减少误操作引起的文件覆盖, 建议针对每个分析项目创建独立的子目录。同时, 在利用同一模型求解不同性质的问题时采用不同的工作文件名, 本书的实例即采用了这样的存储方式, 每个实例建立了自己的文件夹。

1.4.2 ANSYS 文件的存储与恢复

数据库存储操作是将 ANSYS 12.0 数据库从内存中写入一个文件。数据库文件 (以 db 为扩展名) 是数据库当前状态的一个备份。如果用户使用 GUI 模式进行分析, 建议在分析过程中, 隔一段时间存储一次数据库文件。在进行不清除后果 (如划分网格) 或会造成重大影响 (如删除操作) 的操作之前, 最好先存储一下数据库文件。

通过以下几种方式可以实现数据库存储。

- ◆ 选择 File→Save as Jobname.db 命令, 立即保存数据库到 jobname.db 文件中, 其中 jobname 为工作文件名。
- ◆ 选择 File→Save as ...命令, 弹出一个对话框, 允许将数据库存储到以其他名字命名的文件中 (注意: 在 ANSYS 12.0 中, Save as 只将数据库复制到另外一个文件名的文件中, 并不改变当前的工作文件名)。
- ◆ 数据库恢复。如果在进行一个操作前刚刚存储完数据库, 用户可以单击工具条中的 RESUME_DB 按钮, 恢复数据库文件。

1.4.3 读入 ANSYS 文件

在许多场合中, 用 ANSYS 程序时需要读取自己的文件。这个文件或是 ANSYS 命令的文本文件, 或是 ANSYS 数据的二进制文件。

1.4.3.1 读入 ANSYS 文本文件

1. 读入包含 ANSYS 命令流的文本文件, 如 ANSYS 宏文件 (*.MAC)、日志文件 (*.LOG) 等, 选择以下菜单命令:

Utility Menu→File→Read Input from

2. 读取宏文件 Mac, 选择以下菜单命令:

Utility Menu→Macro→Execute Data Block

3. 读取材料特性文件 Jobname.MP, 选择以下菜单命令:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Other→Change Mat Props→Read from File

Main Menu→Preprocessor→Material Props→Read from File

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Change Mat Props→Read from File

4. 读取参数文件 Jobname.PARM, 选择以下菜单命令:

Utility Menu→Macro→Execute Data Block

5. 读取单元文件 Jobname.ELEM, 选择以下菜单命令:

Main Menu→Preprocessor→Create→Elements→Read Elem File

6. 读取节点文件 Jobname.NODE, 选择以下菜单命令:

Main Menu→Preprocessor→Create→Nodes→Read Node File

7. 读入初始应力文件 Jobname.IST, 选择以下菜单命令:

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Initial Stress→Read IS File

1.4.3.2 读入 ANSYS 二进制文件

1. 读入数据库文件 Jobname.DB, 选择以下菜单命令:

Utility Menu→File→Resume from

Utility Menu→File→Resume Jobname.DB

2. 读入结果文件 Jobname.RST、Jobname.RMG 和 Jobname.RFL 等, 选择以下菜单命令:

Utility Menu→List→Results→Load Step Summary

3. 读入优化数据文件 Jobname.OPT, 选择以下菜单命令:

Main Menu→Design Opt→Opt Database→Resume

1.4.4 写出 ANSYS 文件

除了分析过程中 ANSYS 程序自动写入的文件外, 在必要时还可自己进行写文件操作。

1. 写出 ANSYS 数据文件 Jobname.DB, 选择以下菜单命令:

Utility Menu→File→Save as

2. 写出参数到数据库文件 Jobname.PARM, 选择以下菜单命令:

Utility Menu→Parameters→Save Parameters

3. 将单元定义命令写入单元文件 Jobname.ELEM, 选择以下菜单命令:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Write Elem File

4. 将节点定义命令写入节点文件 Jobname.NODE, 选择以下菜单命令:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Write Node File

5. 将材料属性写入材料文件 Jobname.MP, 选择以下菜单命令:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Other→Change Mat Props→Read to File

Main Menu→Preprocessor→Material Props→Read to File

Main Menu→Solution→Load Step Options→Other→Change Mat Props→Read to File

1.4.5 导入导出几何文件

用 ANSYS 进行分析时经常直接导入已有几何模型, 然后进行模型修改, 划分单元网格; 另外, ANSYS 也可以按照某种通用的标准格式输出自己的几何模型, 提供给其他程序。

- ◆ 选择 Utility Menu→File→Import 命令, 其下的子菜单命令分别是导入 IGES 文件、CATIA 文件、CATIA V5 文件、Pro/E 文件、UG 文件、SAT 文件、PARA 文件和 CIF 文件。
- ◆ 选择 Utility Menu→File→Export 命令, 可输出 IGES 文件。

1.5 ANSYS 12.0 结构有限元分析

本节阐述结构有限元分析的基本思想, 同时阐述应用 ANSYS 12.0 进行结构有限元分析的基本过程。

1.5.1 有限元分析的基本思想

有限元分析的基本概念是用较简单的问题代替复杂问题, 然后再求解。有限单元法实质上是一种数值计算方法, 它首先将实际的结构划分为一系列离散单元(这些单元之间通过公关节点连接到一起), 然后对这些单元的组合体进行分析。通常的结构有限元分析过程包括如下几个具体步骤。

1. 结构离散化

通过这一步骤将实际结构划分为一系列单元的组合体, 这也是一切数值方法求解过程的共同之处, 即将连续问题离散化。对于杆件结构系统, 由于结构本身存在着自然的节点连接关系, 因此杆件结构系统是自然离散系统。但是对于各种实体结构来说, 必须经过一个离散的过程, 将连续体划分为一系列离散单元的组合体, 才能形成有限元分析的模型。

2. 单元特性分析

这一步骤是有限元分析的基础, 其目的在于通过分析得到单元节点力与节点位移之间的力学关系, 即计算单元刚度矩阵(简称单刚)。杆件单元的刚度矩阵可通过直观的力学概念得到, 而各种实体单元的单元刚度矩阵需要先假设单元内部的位移插值模式, 再通过变分原理(最小势能原理)得到。需强调的一点是, 单元刚度矩阵是奇异矩阵。

3. 结构分析

有限单元计算中的基本原则之一, 就是要满足相邻单元在公关节点上的位移协调条件。即在一个结构总体刚度矩阵中对单元刚度矩阵元素进行分块叠加, 如果与一个节点对应的刚度矩阵元素作为一个子块, 则结构刚度矩阵一共包含节点总数个子块。与之相对应的, 所有节点载荷也按照结构中的节点编号次序组成结构的节点载荷列向量。这样做的结果, 是建立起整个结构的所有节点载荷与节点位移之间的关系, 实际上就是结构的总体刚度方程, 其系数矩阵被称为结构的总体刚度矩阵, 简称总刚。通过结构分析, 实际上得到了离散化之后的平衡方程(结构的总体刚度方程)。但其中的总体刚度矩阵是奇异的, 这是由单元刚度矩阵的奇异性所造成的, 外在表现为结构整体发生刚体位移的任意性。



4. 引入边界条件

在总体刚度方程中引入边界条件，是在求解之前必须进行的步骤。通过边界约束条件的施加，排除了结构发生整体刚位移的可能性，使得在一定载荷作用下的结构位移可唯一地确定。

5. 求解线性方程组

引入边界条件之后的方程组具有唯一的解，通过各种线性代数方程组的数值求解方法均可得到其解，即得到结构中各节点的位移。单元内部任意点的位移可通过节点位移插值得到，而应变、应力等量可通过位移导出。

6. 后处理与计算结果的评价

得到节点位移之后，可进一步得到应变、应力等量并进行结果的可视化后处理。

简而言之，有限元分析可分成前处理、求解和后处理 3 个阶段。前处理是建立有限元模型，完成单元网格划分；后处理则是采集处理分析结果，使用户能方便地提取信息，了解计算结果。

1.5.2 ANSYS 12.0 结构有限元分析概述

结构有限元分析是有限元分析最常用的一个应用领域，包括土木工程结构、机械结构、航空航天结构等，本书的内容专注于 ANSYS 结构有限元分析部分。ANSYS 12.0 软件提供了如下几种结构分析类型。

- ◆ **静力分析：**用于求解静力载荷作用下结构的位移和应力等。静力分析包括线性和非线性分析两种。非线性分析涉及塑性、应力刚化、大变形、大应变、超弹性、接触和蠕变分析。
- ◆ **动力分析：**包括模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析和谱分析 4 类。模态分析用于计算结构的固有频率和模态。谐响应分析用于确定结构在随时间正弦变化的载荷作用下的响应。瞬态动力学分析用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的响应，并且可涉及上述提到的结构静力分析中所有的非线性性质。谱分析是模态分析的应用拓广，用于计算由于响应谱或 PSD 输入（随机振动）引起的应力和应变。
- ◆ **屈曲分析（即稳定性分析）：**用于计算屈曲载荷和确定屈曲模态。ANSYS 12.0 可进行线性（特征值）和非线性屈曲分析。
- ◆ **显示动力分析：**ANSYS/LS-DYNA 可用于计算高度非线性动力学和复杂的接触问题。

1.5.3 ANSYS 12.0 结构有限元分析过程

1.5.1 节介绍了结构有限元分析的基本思想，那么这一思想如何在通用有限元分析软件 ANSYS 中实现呢？下面就来介绍在 ANSYS 中进行结构有限元分析的一般流程。

与有限元的基本分析过程相对应，典型的 ANSYS 12.0 结构有限元分析过程也包括如下 3 个步骤。

- step 1 创建有限元模型：**包括指定工作文件名和工作标题、创建或读入几何模型、定义单元类型、定义单元实常数、定义材料属性及有限元网格划分。
- step 2 施加载荷进行求解：**包括施加载荷、施加边界条件和求解计算。
- step 3 查看求解结果：**包括结果的观察、分析和检验。



1.5.3.1 建立有限元模型

1. 指定工作文件名

文件名是用来识别 ANSYS 分析项目的, 通过分析的项目指定文件名, 可以确保文件不被覆盖。如果用户在开始分析时没有定义工作文件名, 则所有的文件名都被默认为 file。ANSYS 12.0 的工作文件名可以通过如下方式进行改写。

- ◆ 进入 ANSYS 12.0 时, 通过入口选项进行修改, 参阅 1.2.1 节。
- ◆ 进入 ANSYS 12.0 后, 选择 Utility Menu→File→Change Jobname 命令进行修改。



该项工作并不是必须要求完成的, 但是在对多个工程问题进行分析时, 推荐指定工作文件名, 本书中的实例即采用这样的方法。

2. 定义单元类型

ANSYS 12.0 提供了将近 200 种不同的单元类型, 每一种单元类型都有自己特定的编号和单元类型名, 如 LINK1、PLANE42、SOLID92 等。

在主菜单中选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令, 可以定义单元类型。

3. 定义单元实常数

实常数是指在分析过程中需要用到的单元类型 (杆件单元、板单元、实体单元等) 的补充几何特性, 如梁单元的横截面积、惯性矩, 板壳单元的厚度等。指定了单元类型之后, 应根据单元类型指定相应的实常数。

在主菜单中选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令, 可以定义单元实常数。

4. 定义材料属性

在所有的分析中都要输入材料属性, 材料属性根据所分析的问题的物理环境不同而不同。如在结构分析中必须输入材料的弹性模量、泊松比; 在热结构耦合分析中必须输入材料的导热系数、线膨胀系数; 如果在分析过程中需要考虑重力、惯性力, 则必须输入材料的密度; 如果要进行动力学分析, 也要输入材料的密度。ANSYS 12.0 定义了 100 多种材料模型, 用户只需要按照模型格式输入相关数据, 即可定义常用材料和某些特定材料的材料属性。除了磁场分析之外, 在输入数据时, 用户不需要指定 ANSYS 所用的单位, 但要注意: 所有输入量的单位必须保持统一。

在主菜单中选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props 命令, 可以定义单元材料属性。

5. 创建几何模型

建立几何模型就是建立一个与实际结构外形大致相同 (相同程度根据计算精度, 按照结构的简化原则而定) 的几何图形元素的组合体。

在 ANSYS 中, 所有问题的几何模型都是由关键点、线、面、体等各种图形元素 (简称图元) 所构成的, 图元层次由高到低依次为体、面、线及关键点。

可以通过自底向上 (Bottom-Up Method) 或自顶向下 (Top-Down Method) 两种途径来建立几何模型。自底向上的建模方式首先定义关节点, 再由这些点连成线, 由线组成面, 由面围合形成

体积，即由低级图元到高级图元的建模顺序。自顶向下的建模方式直接建立较高层次的图元对象，与其对应的较低层次的图元对象随之自动产生，用这种方式建模会用到布尔运算，即各种类型的对象的相互加、减、组合等操作。

6. 进行有限元网格划分

在几何模型上进行单元剖分，形成有限单元网格（Mesh）。一般情况下，在 ANSYS 中划分有限元网格分为定义划分形成的单元属性（属于何种单元类型、实参数类型以及材料类型）、指定网格划分的密度和执行网格划分 3 个步骤。



在 ANSYS 建模过程中，也可采用逐个定义节点和单元的直接建模方法，这种方法适用于建立单元数较少的有限元分析模型。比如建立简单的平面桁架模型，可先定义节点，然后连接节点，形成杆单元。

1.5.3.2 加载求解

在建立有限元模型之后，可以运用 SOLUTION 处理器定义分析类型和分析选项，施加载荷，指定载荷步长，进行求解，其具体步骤如下。

1. 定义分析类型和分析选项

ANSYS 12.0 的分析类型包括静态、瞬态、调谐、模态、谱分析、挠度和子结构分析等，用户可以根据需要解决的工程问题进行选择。对于各种分析，需要设置相应的参数，比如分析所用的求解器类型、非线性分析选项和迭代次数设置、模态分析的模态提取方法和模态提取数等各种分析选项。这些选项的具体设置方法将在后续相关章节中陆续地加以介绍。

2. 加载

ANSYS 的载荷分为 6 大类：位移载荷、力或力矩、面载荷、体积载荷、惯性载荷和耦合场载荷，这些载荷大部分可以施加到几何模型上，包括关键点、线和面；也可以施加到有限元模型上，包括单元和节点。

施加在几何模型上的载荷独立于有限单元网络，也就是说可以改变结构的网格划分而不影响已施加的载荷。施加于有限元模型上的载荷在网格修改时将会失效，需要删除以前的载荷并在新的网格上重新定义载荷。

程序在开始求解之前，将会自动地将施加于几何实体模型上的载荷转换到有限元模型上，但转换过程中可能出现几何模型与有限元模型之间坐标系方向不一致而引起的加载方向偏差的问题。

3. 指定载荷步选项

载荷步选项的功能是对载荷步进行修改和控制，包括对子步数、步长和输出等进行控制。

4. 求解

在施加了载荷并设置了相关的分析选项之后，即可调用求解程序开始求解。在求解过程中，可通过屏幕输出窗口获取计算过程的一些实时信息。其主要功能是在 ANSYS 软件数据库中获得模型和载荷信息，进行计算求解，并将结果数据写入结果文件（Jobname.RST、Jobname.RTH、Jobname.RMG 或 Jobname.RFL）和数据库中。

1.5.3.3 查看求解结果

这一步骤是对计算的结果数据进行可视化处理和相关的分析,可以利用 ANSYS 的通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 来完成。一般的后处理包括如下几个操作环节。

1. 进入后处理器并读入计算结果

进行结果的后处理之前,需要先进入相应的后处理器。进入通用后处理器之后,第一步就是把计算结果文件读入数据库。而当进入时间历程后处理器时,结果文件会自动载入。

2. 进行后处理操作

利用通用后处理器程序可以显示结构变形情况、各种物理量的等值线分布图形等,对各种数据信息进行列表操作,并可动画显示各种量的变化过程。利用时间历程后处理器可以绘制各种变量的时间历程变化曲线,或者一个变量相对于另一个变量的变化曲线。具体的后处理操作方法将在后续各章的例题中进行介绍。

3. 输出后处理操作的结果

后处理操作得到的一些图形或动画结果可以输出到文件,也可被组织成多媒体形式的分析报告。

1.6 ANSYS 结构有限元分析初体验：两杆桁架静力分析

本节以最简单的例子——两杆桁架静力分析为例,和读者一起学习 ANSYS 12.0 在结构有限元分析方面的标准操作过程,让读者领略使用大型通用有限元软件进行结构有限元分析的便捷性和高效性。希望通过简单实例的学习,激发读者的兴趣,从而进入后续章节的更复杂实例的学习,进而逐步将读者引入 ANSYS 结构有限元分析的神圣殿堂。

1.6.1 问题描述与分析

如图 1.12 所示为一个两杆桁架,杆截面面积为 0.2m^2 ,弹性模量为 $2.1 \times 10^{11}\text{N/m}^2$,泊松比为 0.3。节点坐标及受力见图 1.12。要求用 ANSYS 计算出臂端节点的竖向位移和支座处的反作用力。

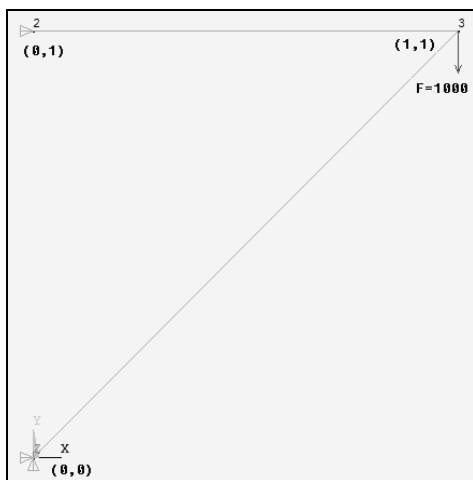


图 1.12 两杆桁架

由于该模型比较简单, 此处采用直接建立节点、单元的方法进行有限元建模。单元类型选择 LINK1 二维杆单元, 单元长度为整个杆件的长度。

1.6.2 求解过程

1.6.2.1 定义工作目录及文件名

启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口, 如图 1.13 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 选项, 在 Working Directory 输入栏中输入工作目录 C:\ANSYS 12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 1\1-1, 在 Job Name 栏中输入工作文件名: Chapter1-1。以上参数设置完毕后, 单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

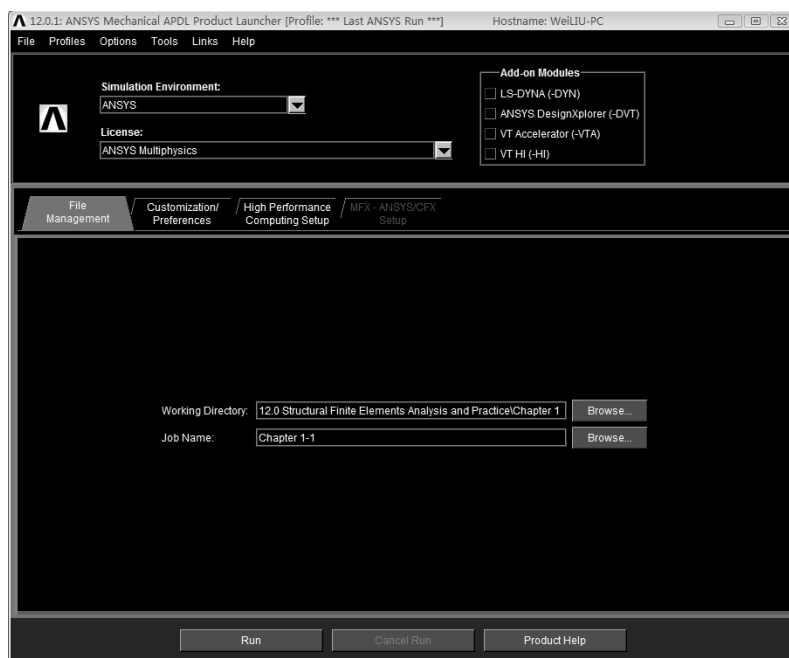


图 1.13 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口



可以先在目标文件位置建立工作目录, 然后单击 Browse 按钮选择工作目录; 也可以通过单击 Browse 按钮来选择工作文件名。

1.6.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1

选择 Main Menu→Preferences 命令, 弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框, 如图 1.14 所示, 在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框, 过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令, 弹出 Element Types 对话框, 如图 1.15 所示, 单击 Add 按钮, 弹出 Library of Element Types 对话框, 在 Library of Element Types 列表框中选择 Link 中的 2D spar 1 单元, 如图 1.16 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框, 然后单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

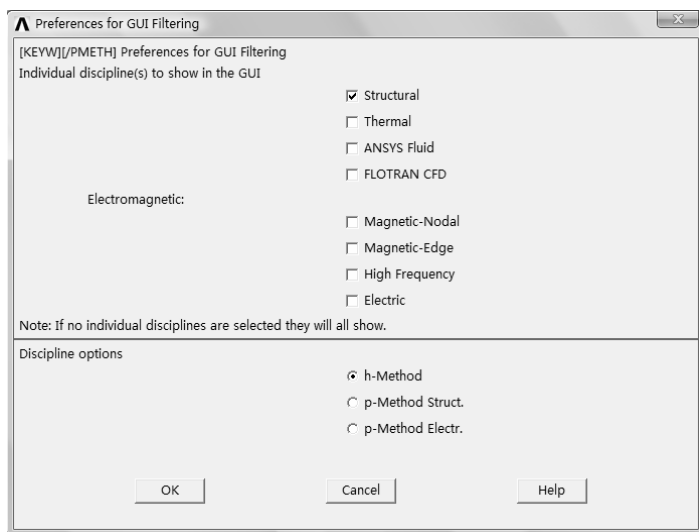


图 1.14 Preferences for GUI Filtering 对话框

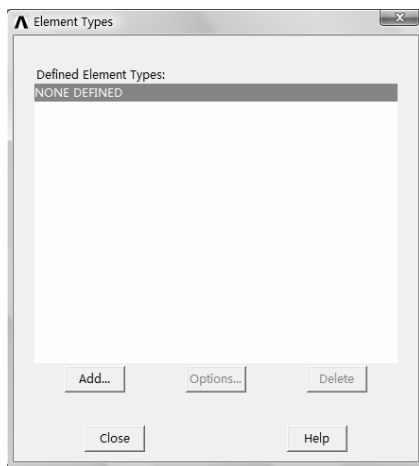


图 1.15 Element Types 对话框

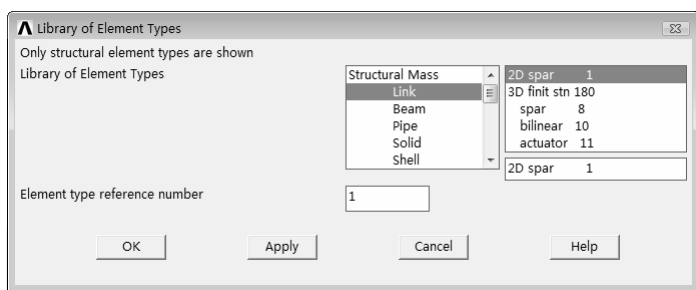


图 1.16 Library of Element Types 对话框

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，如图 1.17 所示，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.1×10^{11} ，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如

图 1.18 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令, 关闭该对话框。

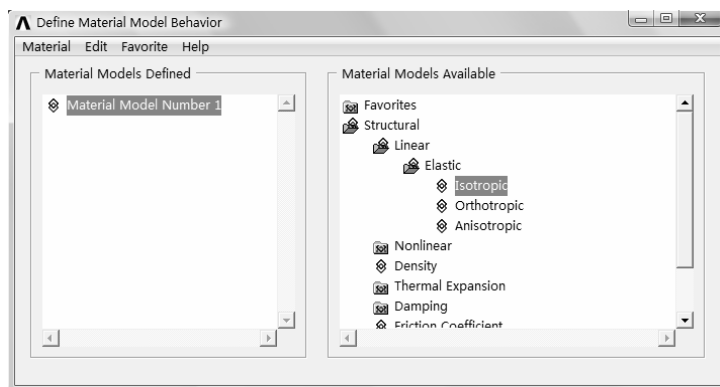


图 1.17 Define Material Model Behavior 对话框

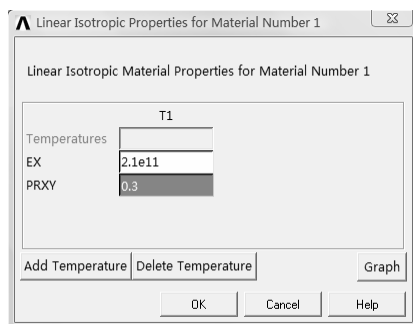


图 1.18 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 4

选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令, 弹出 Real Constants 对话框, 如图 1.19 所示。单击 Add 按钮, 弹出 Real Constant Set Number 1, for LINK1 对话框, 在 Cross-sectional area AERA 输入栏中输入 0.25, 如图 1.20 所示。单击 OK 按钮关闭 Real Constant Set Number 1, for LINK1 对话框, 再单击 Close 按钮关闭 Real Constants 对话框。

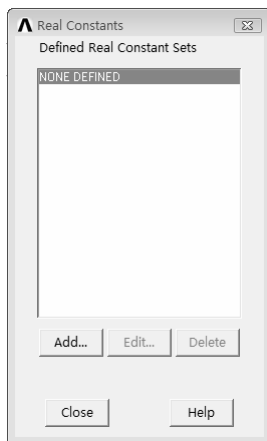


图 1.19 Real Constants 对话框

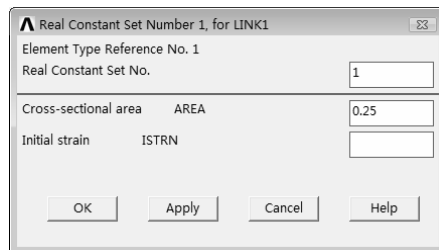



图 1.20 Real Constant Set Number 1, for LINK1 对话框

step 5 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。



也可用鼠标单击  按钮或 SAVE_DB 按钮来实现保存操作。

1.6.2.3 创建有限元模型

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS 命令，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 0、0、0，如图 1.21 所示，单击 Apply 按钮建立节点 1；然后再在 NODE Node number 输入栏中输入 2，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 0、1、0，单击 Apply 按钮建立节点 2；最后在 NODE Node number 输入栏中输入 3，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 1、1、0，单击 OK 按钮建立节点 3，并关闭 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框。生成的节点效果如图 1.22 所示。

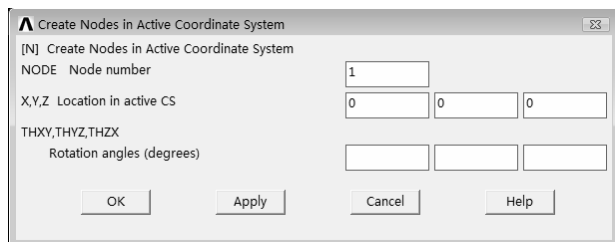


图 1.21 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框



图 1.22 生成的节点效果显示

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes 命令，弹出 Elements from Nodes 拾取菜单，如图 1.23 所示，依次选择 1 号、3 号节点，单击 Apply 按钮，生成单元 1。再依次选择 2 号、3 号节点，单击 OK 按钮，生成单元 2，同时关闭 Elements from Nodes 拾取菜单。生成的单元效果如图 1.24 所示。

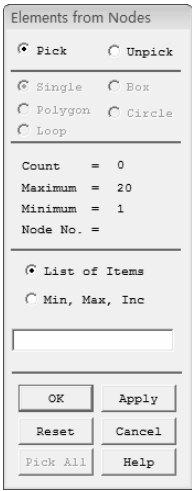


图 1.23 Elements from Nodes 拾取菜单

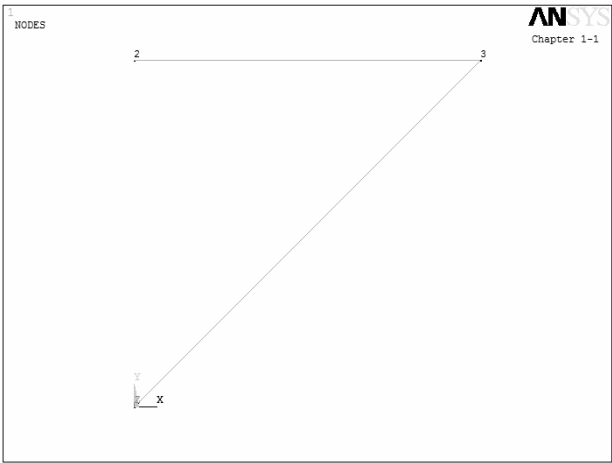


图 1.24 生成所有单元的效果显示

step 3 至此，我们已经完成了两杆桁架的有限元模型的建立，选择 Main Menu→Finish 命令，退出前处理器。

step 4 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

1.6.2.4 加载求解

step 1 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，如图 1.25 所示，用鼠标拾取节点 1，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，如图 1.26 所示，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX、UY 选项，单击 Apply 按钮；再用鼠标拾取节点 2，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX 选项，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 窗口中显示施加位移约束后的效果，如图 1.27 所示。

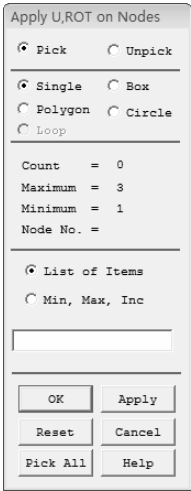


图 1.25 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单

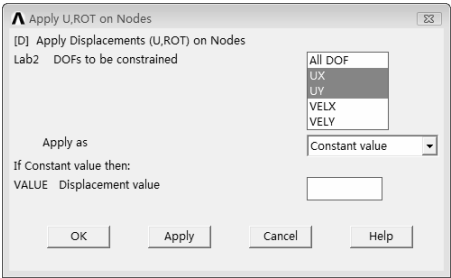


图 1.26 Apply U,ROT on Nodes 对话框

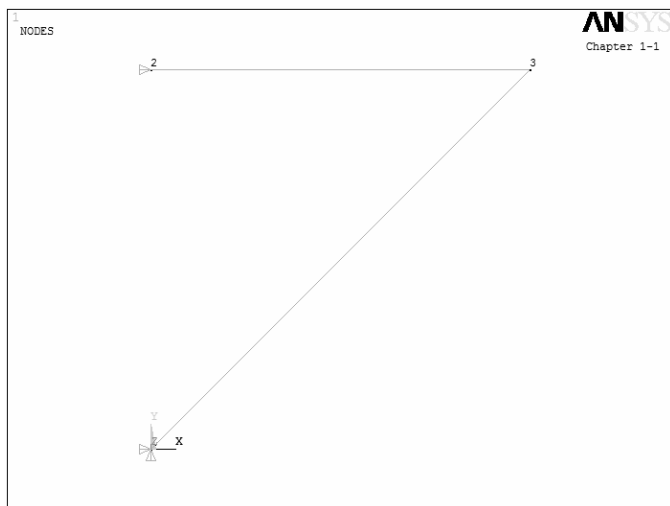


图 1.27 施加位移约束后的效果



该操作对两个节点进行位移约束，即约束节点 1 的 X、Y 方向位移、约束节点 2 的 Y 方向位移。由结构力学的知识可知，此时的两杆桁架为静定结构。

step 2

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes 命令，弹出 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，如图 1.28 所示，用鼠标拾取节点 3，单击 Apply 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉列表框中选择 FY 选项，在 VALUE Force/moment value 输入框中输入-1000，如图 1.29 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 窗口将显示施加载荷后的效果，如图 1.30 所示。

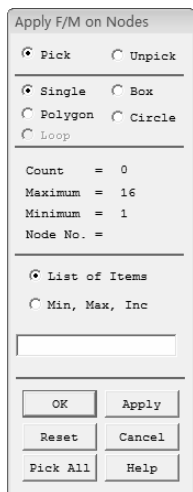


图 1.28 Apply F/M on Nodes 拾取菜单

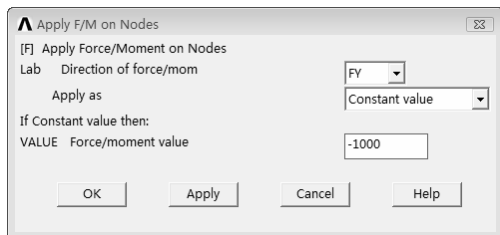


图 1.29 Apply F/M on Nodes 对话框



该操作是对两杆桁架施加集中载荷，输入为负值，表示方向为 Y 轴负方向。

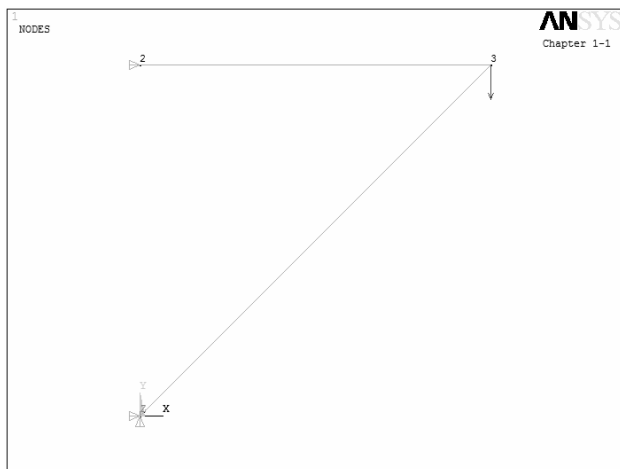


图 1.30 施加载荷后的效果

step 3 选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，如图 1.31 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 4 选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，如图 1.32 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

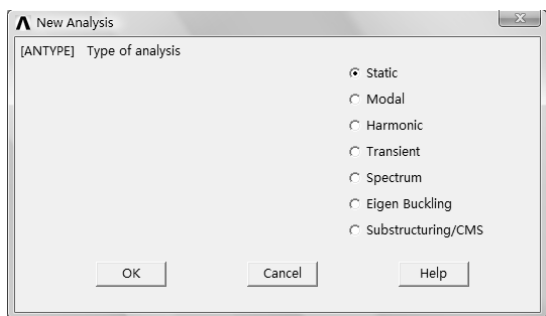


图 1.31 New Analysis 对话框

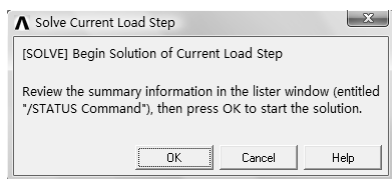


图 1.32 Solve Current Load Step 对话框

step 5 求解结束时，弹出 Note 对话框，如图 1.33 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

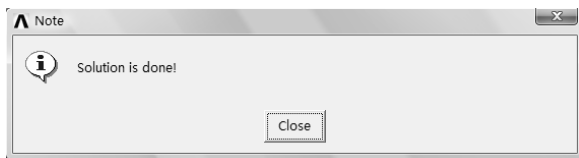


图 1.33 Note 对话框

step 6 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。至此，加载及求解过程结束，下面开始查看和分析结果。

1.6.2.5 查看求解结果

step 1 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选中 Def + undeformed 单选按钮，如图 1.34 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变

形的几何形状,如图 1.35 所示。从结果中可以看出,节点 3 的位移为 $0.942\text{e-}7\text{m}$ 。

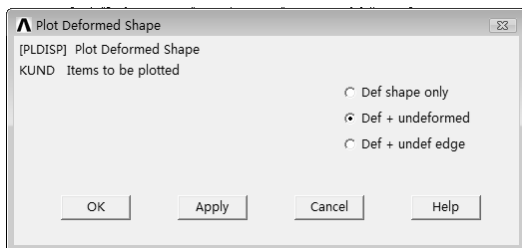


图 1.34 Plot Deformed Shape 对话框

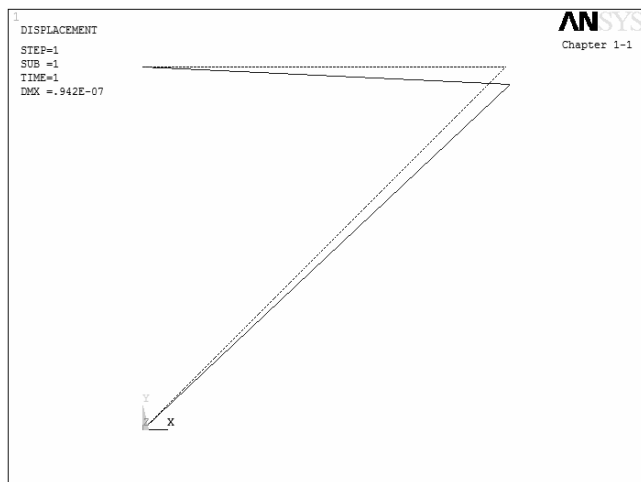


图 1.35 变形后的几何形状和未变形的几何形状

step 2

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solu 命令,弹出 List Reaction Solution 对话框,在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All struc forc F 选项,如图 1.36 所示,单击 OK 按钮,出现支座节点反作用力结果列表,如图 1.37 所示。读者可根据结构力学的知识来检验结果的正确性。

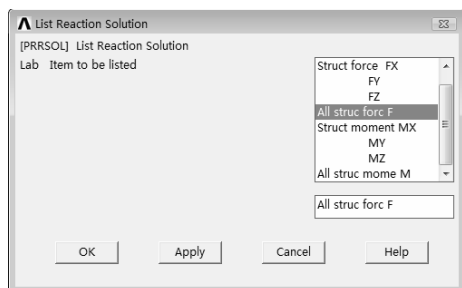


图 1.36 List Reaction Solution 对话框

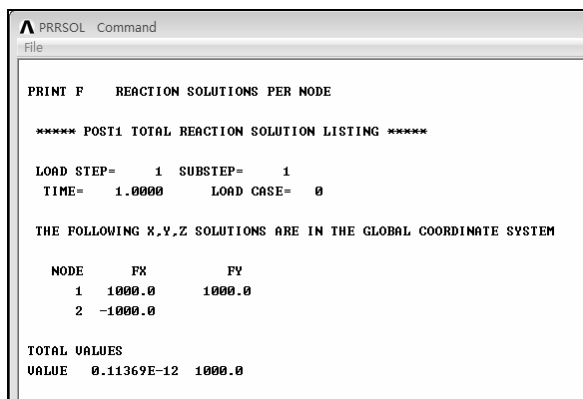


图 1.37 支座节点反作用力结果列表

step 3

选择 Utility Menu→File→Exit 命令,弹出 Exit from ANSYS 对话框,选择 Save Everything 单选按钮,如图 1.38 所示,单击 OK 按钮,关闭 ANSYS 程序。

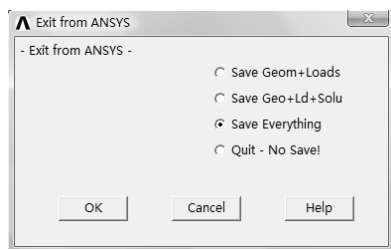


图 1.38 Exit from ANSYS 对话框

至此，我们完成了第一个 ANSYS 结构有限元分析实例。怎么样？是不是很简单？这就是大型通用有限元软件 ANSYS 给我们带来的便捷性和高效性。

1.7 小结

本章介绍了 ANSYS 12.0 软件的主要概况、基本界面和操作方法，对 ANSYS 12.0 的部分概念进行了一定的阐述，使读者对 ANSYS 12.0 软件的应用有了概念性的认识和初步的了解，以便于下一步具体问题的学习。最后以一个简单的两杆桁架为例，介绍了 ANSYS 结构有限元分析的具体操作过程，让读者领略到了 ANSYS 的便捷性和高效性。



第 2 章 几何建模与网格划分

本章包括

- ◆ 有限元模型建立概述
- ◆ 自底向上建模
- ◆ 布尔运算与模型修改
- ◆ 自由网格与映射网格
- ◆ ANSYS 坐标系与工作平面
- ◆ 自顶向下建模
- ◆ 网格属性与划分控制

在对问题进行有限元分析时，首先要做的就是针对该问题建立适当的有限元模型，模型要与结构系统的几何外形基本一致。建立有限元模型有两种方法，即直接法与间接法。直接法是直接根据结构的几何外形建立节点和元素，不需要再进行网格划分，适用于比较简单的结构系统。而间接法是通过点、线、面、体积，先建立有限元几何模型，再进行实体网格划分，以完成有限元模型的建立，适用于较复杂的结构。

本章首先对 ANSYS 几何建模进行概述，然后从坐标系与工作平面这些基本概念开始，详细介绍几何建模的基本方法、布尔运算与模型修改的基本过程，最后对有限元网格划分进行阐述。

2.1 有限元模型建立概述

有限元分析的最终目的是还原一个实际工程系统的数学行为特征，即针对一个物理原型建立准确的数学模型。有限元模型包括节点、单元、材料属性、实常数、边界条件，以及其他用来表现这个物理系统的特征。在 ANSYS 中，有限元模型的建立是指用节点和单元来表示实际系统连接的生成过程。本节简单介绍有限元模型建立的典型步骤及基本方法。

2.1.1 典型步骤

ANSYS 中有限元模型建立的典型步骤如下。

- step 1** 确定分析方案。在进入 ANSYS 之前，首先确定分析目标，决定模型采取什么样的基本形式，选择合适的单元类型，并考虑如何建立适当的网格密度。
- step 2** 进入前处理 (PREP7)，建立工作平面，激活适当的坐标系，利用几何元素和布尔运算操作生成基本的几何形状。
- step 3** 用自底向上的方法生成实体，即先定义关键点，然后再生成线、面和体。用布尔运算或编号控制将各个独立的实体模型适当地连接在一起。
- step 4** 生成单元属性表 (单元类型、实常数、材料属性和单元坐标系)，设置单元属性编号。
- step 5** 设置网格划分控制，以建立想要的网格密度，通过对实体模型划分网格来生成节点和单元。
- step 6** 在生成节点和单元之后，再定义面对面的接触单元、自由度耦合及约束方程等。

step 7 把模型数据存为 Jobname.DB。

step 8 退出前处理。

2.1.2 基本方法

ANSYS 程序为用户提供了以下 3 种建模方法。

- ◆ 利用直接生成方法建模。
- ◆ 在 ANSYS 中创建实体模型。
- ◆ 输入在计算机辅助设计系统 (CAD) 中创建的实体模型。

2.1.2.1 利用直接生成方法建模

利用直接生成方法进行建模,就是在 ANSYS 程序中直接建立节点和单元,不需要再进行网格划分,其优缺点如下。

优点:

- ◆ 适合于小型模型、简单模型及规则模型。
- ◆ 能够对几何形状及每个节点和单元编号进行完全控制。

缺点:

- ◆ 需要处理的数据量大,烦琐,效率低。
- ◆ 不能使用自适应网格划分功能。
- ◆ 不方便进行优化设计。
- ◆ 修改网格划分精度十分困难,不能使用 SmartSizing 等工具。
- ◆ 需要用户留意网格划分的每一个细节,更容易出错。

2.1.2.2 在 ANSYS 中创建实体模型

实体建模是先创建由关键点、线、面和体构成的几何模型,然后利用 ANSYS 的网格划分功能对其进行网格划分,自动生成所有的节点和单元,其优缺点如下。

优点:

- ◆ 适用于庞大或复杂的模型,特别是三维实体模型。
- ◆ 相对而言需处理的数据量少,简单,效率高。
- ◆ 允许对节点和单元进行几何操作,如拖拉和旋转等。
- ◆ 支持使用面素和体素及布尔运算等建立模型。
- ◆ 方便使用 ANSYS 程序的优化设计功能。
- ◆ 可以进行自适应网格划分。
- ◆ 可以在施加载荷之后对网格进行局部网格细化处理。
- ◆ 方便进行几何模型上的改进。
- ◆ 方便改变单元类型,不受有限元模型的限制。

缺点:

- ◆ 有时需要大量的 CPU 处理时间。
- ◆ 对小型、简单的模型有时很烦琐, 比直接生成方法需要更多的数据。
- ◆ 在某些条件下可能会失败, 即程序不能生成有限元网格。

2.1.2.3 输入在计算机辅助设计系统 (CAD) 中创建的实体模型

ANSYS 程序为不同的三维建模软件提供了导入导出接口, 从而避免在 ANSYS 中建模, 可在用户擅长的 CAD 系统中建模, 存成 IGES 文件格式或其他 ANSYS 接口产品的文件格式, 并把它输入 ANSYS 中进行网格划分。但是, 如果从 CAD 系统中输入模型不适于进行网格划分, 则需要完成大量的几何修改工作。

选择 Utility Menu→File→Import 命令, 可以从 CAD 软件系统中导入实体模型。

2.2 ANSYS 坐标系与工作平面

在进行 ANSYS 有限元建模的过程中, 坐标系的选择和工作平面的使用是必不可少的。

2.2.1 坐标系及操作

ANSYS 提供了多种坐标系供用户选择, 常用的主要有以下几种。

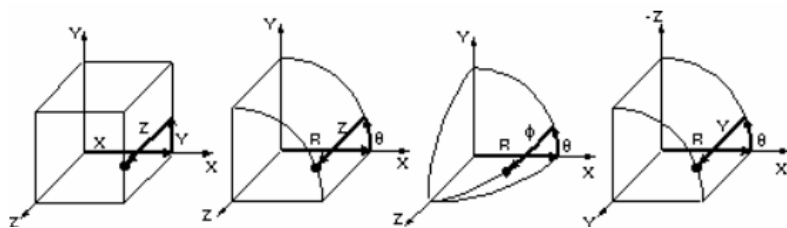
- ◆ **总体和局部坐标系 (Global CS and Local CS):** 用来定位几何形状参数 (节点、关键点等) 的空间位置。
- ◆ **活动坐标系 (Active CS):** 当前被激活的坐标系。
- ◆ **显示坐标系 (Display CS):** 用于几何形状参数的列表和显示。
- ◆ **节点坐标系 (Nodal CS):** 定义每个节点的自由度方向和节点结果数据的方向。
- ◆ **单元坐标系 (Element CS):** 确定材料特性主轴和单元结果数据的方向。
- ◆ **结果坐标系 (Results CS):** 用来列表、显示或在通用后处理 (POST1) 操作中将节点或单元结果转换到一个特定的坐标系中。

2.2.1.1 总体坐标系和局部坐标系

总体和局部坐标系用来定位几何体。当定义一个节点或关键点时, 默认状态下其坐标系为总体笛卡儿坐标系。但对于有些模型, 定义为不是总体笛卡儿坐标系的其他坐标系可能更方便, 如柱坐标系和球坐标系。ANSYS 程序允许用预定义的 3 种总体坐标系中的任意一种来输入几何数据, 或在用户定义的任何局部坐标系中进行此项工作。

1. 总体坐标系

总体坐标系为绝对坐标系, ANSYS 程序提供了笛卡儿坐标系、柱坐标系和球坐标系 3 种总体坐标系。这 3 种系统具有共同原点, 且均为右手系。它们由其坐标系号来识别: 0 代表笛卡儿坐标, 1 代表柱坐标, 2 代表球坐标, 如图 2.1 所示。



a) 笛卡儿坐标系 b) 柱坐标系 c) 球坐标系 d) 柱坐标系 Y

图 2.1 总体坐标系

选择 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cartesian 命令，可以定义笛卡儿坐标系，命令为 CSYS, 0。选择其他命令还可以分别建立柱坐标系、柱坐标系 Y 及球坐标系，命令为 CSYS, 1 和 CSYS, 2。

与之相关的 ANSYS 菜单操作系统如图 2.2 所示。

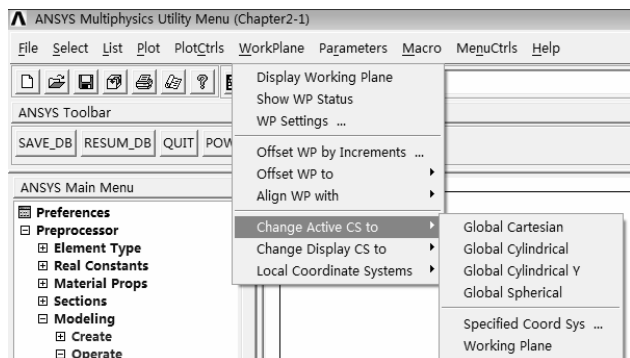


图 2.2 总体坐标系菜单

2. 局部坐标系

在许多情况下，有必要建立自己的坐标系。其原点与总体坐标系的原点偏移一定的距离，或其方位不同于先前定义的总体坐标系。局部坐标系和全局坐标系一样，可以是笛卡儿坐标系、柱坐标系和球坐标系中的任何一种坐标系，还可以建立环形坐标系，但一般不建议在环形坐标系下进行实体建模操作，因为这样可能会生成不是用户想要的面或体。

选择 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc 命令，可以按总体笛卡儿坐标定义局部坐标系，命令为 LOCAL。ANSYS 程序还可以通过已有节点定义局部坐标系、通过已有关键点定义局部坐标系、以当前定义的工作平面原点为中心定义局部坐标系，读者可自行尝试操作。当用户定义了一个局部坐标系后，它就会被激活。当创建了局部坐标系后，分配给它一个坐标系号（必须是 11 或更大），可以在 ANSYS 进程中的任何阶段建立局部坐标系。与上述操作相关的 ANSYS 菜单操作系统如图 2.3 所示。

2.2.1.2 活动坐标系

用户可定义任意多个坐标系，但某一时刻只能有一个坐标系被激活。用户可以自动激活总体笛卡儿坐标系，然后每定义一个新的局部坐标系，这个新的坐标系就会自动被激活。如果要激活一个总体坐标系或以前定义的坐标系，可以选择 Utility Menu→Change Active CS to→Global Cartesian 命令，命令为 CSYS，读者也可以执行该菜单中的其他命令，此处不再详述，读者可自行尝试。

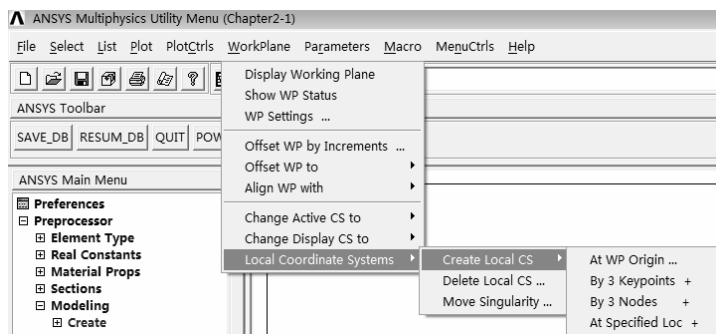


图 2.3 局部坐标系菜单

在 ANSYS 程序运行的任何阶段都可以激活某个坐标系。若没有明确地改变激活的坐标系，当前激活的坐标系将一直保持有效。需要注意的是，在定义节点或关键点时，不管激活的是哪个坐标系，程序都将坐标标为 X、Y 和 Z，如果激活的不是笛卡儿坐标系，用户应将 X、Y、Z 理解为柱坐标系中的 R、 θ 、Z 或球及环形坐标系中的 R、 θ 、 Φ 。

2.2.1.3 显示坐标系

在默认情况下，即使是在其他坐标系中定义的节点和关键点，其列表都显示它们的总体笛卡尔坐标。选择 Utility Menu→WorkPlane→Change Display CS to→Global Cartesian 命令，可以改变显示坐标系为笛卡儿坐标系，命令为 DSYs。当然，也可以将其改变成其他坐标系，如柱坐标系、球坐标系等，读者可自行尝试。

与上述操作相关的 ANSYS 菜单操作系统如图 2.4 所示。

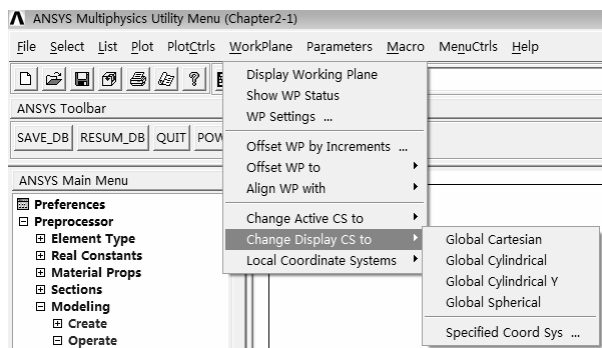


图 2.4 显示坐标系菜单

改变显示坐标系也会影响图形显示。除非用户有特殊的需要，一般在用诸如 NPLOT（节点显示）、EPLOT（单元显示）命令显示图形前，应将显示坐标系重置为 C、S、0（总体笛卡儿坐标系）。DSYs 命令对 LPLOT（线显示）、APLOT（面显示）、VPLOT（体显示）命令无影响。

2.2.1.4 节点坐标系

每个节点都有自己的坐标系，称为节点坐标系。总体和局部坐标系用于几何体的定位，而节点坐标系则用于定义节点自由度的方向。默认情况下，节点坐标系总是笛卡儿坐标系，并平行于总体笛卡儿坐标系（与定义节点的激活的坐标系无关），可用下列方法将任意节点坐标系旋转到

所需的方向。

- ◆ 将节点坐标系旋转到激活坐标系的方向。即节点坐标系的 X 轴转成平行于激活坐标系的 X 轴或 R 轴, 节点坐标系的 Y 轴旋转到平行于激活坐标系的 Y 轴或 θ 轴, 节点坐标系的 z 轴平行于激活坐标系的 z 轴或 Φ 轴。命令为 NROTAT, 菜单操作为: 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Rotate Node CS→To Active CS 命令。
- ◆ 按给定的旋转角旋转节点坐标系 (由于通常不易得到旋转角, 因此 NROTAT 命令可能更有用), 在生成节点时可以定义旋转角度, 或对已有节点指定旋转角度。命令为 NMODIF, 菜单操作为: 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Rotate Node CS→By Angles 命令。
- ◆ 按方向余弦旋转节点坐标系。命令为 NANG, 菜单操作为: 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Rotate Node CS→By Vectors 命令。
- ◆ 显示节点坐标系的命令为 NLIST, 菜单操作为: 选择 Utility Menu→List→Nodes 命令。

2.2.1.5 单元坐标系

每个单元都有它自己的坐标系, 主要用于规定正交材料特性的方向和面力结果 (如应力和应变) 的输出方向。而且对后处理也很有用, 如提取梁和壳单元的膜力等。所有的单元坐标系都是正交右手系。大多数单元坐标系的默认方向遵循以下规则。

- ◆ 线单元的 X 轴通常从该单元的 I 节点指向 J 节点。
- ◆ 壳单元的 X 轴通常也取 I 节点到 J 节点的方向。Z 轴过 I 点且与壳面垂直, 其正方向由单元的 I、J 和 K 节点按右手定则确定, Y 轴垂直于 X 轴和 Z 轴。
- ◆ 二维和三维实体单元的单元坐标系总是平行于总体笛卡尔坐标系。
- ◆ 并非所有的单元坐标系都符合上述规则, 对于特定单元坐标系的默认方向, 可参见 ANSYS 帮助文档。



对面单元和体单元而言, 可选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs 命令, 将单元坐标系的方向调整到已定义的局部坐标系上。

2.2.1.6 结果坐标系

在求解的过程中, 计算的结果数据有位移 (UX、UY、ROTX 等), 梯度 (TGX、TGY 等), 应力 (SX、SY、SZ 等), 应变 (EPPLX、EPPLXY 等) 等。这些数据存储在数据库和结果文件中, 要么是在节点坐标系 (初始或节点数据) 中, 要么是在单元坐标系 (导出或单元数据) 中。但是, 结果数据通常是旋转到激活的结果坐标系 (默认为总体坐标系) 中进行显示、列表和单元表数据存储 (ETABLE 命令)。

用户可将活动的结果坐标系转到另一个坐标系 (如总体坐标系或一个局部坐标系), 或转到在求解时所用的坐标系下 (如节点和单元坐标系)。如果用户列表、显示或操作这些结果数据, 则它们将首先被旋转到结果坐标系下。选择 Main Menu→General Postproc→Options for Output 命令可

以改变结果坐标系，命令为 RSYS。



时间历程后处理器 POST26 中的结果数据是在节点坐标系下表达的，而通用后处理器 POST1 中的结果是按结果坐标系进行表达的。

2.2.2 工作平面及使用

尽管屏幕上的光标只表示一个点，但实际上它代表的是空间中垂直于屏幕的一条直线。为了能用光标选取一个点，首先必须定义一个假想的平面，当该平面与光标所代表的垂线相交时，就能唯一地确定空间中的一个点。在 ANSYS 中，这个假想的平面叫做工作平面 (Working Plane)。工作平面是创建几何模型的参考平面，在预处理模块中用于辅助建模。从另一个角度讲，工作平面就如同一个绘图板，可按用户的要求进行移动和旋转，工作平面可以不平行于屏幕。

工作平面是一个无限平面，有原点、二维坐标系、捕捉增量和栅格显示。同一时刻只能定义一个工作平面，工作平面独立于坐标系，可以随意地移去和旋转。进入 ANSYS 程序后，有一个默认的工作平面——全局笛卡尔坐标系的 X-Y 平面，工作平面的 X 轴和 Y 轴分别为全局笛卡尔坐标系的 X 轴和 Y 轴。工作平面的常用操作包括工作平面的显示与隐藏、工作平面的显示风格与捕捉设置、工作平面的移动与旋转等。对应的 ANSYS 中的系统操作菜单如图 2.5 所示。关于工作平面的其他高级操作，请读者参考 ANSYS 自带的其他帮助文档。

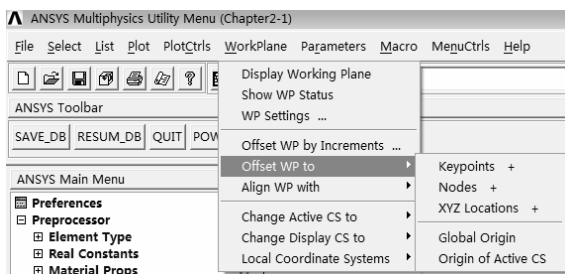


图 2.5 工作平面相关操作菜单

2.2.2.1 工作平面的显示与隐藏

在默认情况下，ANSYS 主界面上只显示全局笛卡尔坐标系，执行 Utility Menu→WorkPlane→Display Working Plane 命令，在界面上将显示工作平面坐标系，它和全局笛卡尔坐标系重合，其 3 个坐标轴分别为 WX、WY 和 WZ，如图 2.6 所示。



图 2.6 显示工作平面

如果需要隐藏工作平面，再次执行 Utility Menu→WorkPlane→Display Working Plane 命令，此时界面上显示的工作平面消失，即工作平面已经切换为隐藏状态。

2.2.2.2 工作平面的显示风格与捕捉设置

工作平面的坐标形式和各种功能可以根据需要进行设置，如打开/关闭捕捉功能、打开/关闭栅格等。执行 Utility Menu→WorkPlane→WP Settings ...命令，弹出如图 2.7 所示的 WP Settings 对话框，对应的 ANSYS 命令为 WPSTYL。

该对话框可以进行如下 4 种选项设置。

- ◆ 可以选择工作平面的坐标类型，或为直角坐标系，或为极坐标系，如图 2.8 所示。在创建矩形等特征几何对象时，选择直角坐标系形式比较方便；在创建圆形、圆柱体等特征几何对象时，选择极坐标系形式比较方便。
- ◆ 可以设置是否显示坐标轴或栅格线，或者同时显示。
- ◆ 可以设置是否打开捕捉功能并设置捕捉增量，即鼠标拾取工作平面上的位置点时移动鼠标的最小距离（栅格的间距）和能够捕捉到的位置点（栅格的交点）。
- ◆ 设置栅格线间距、栅格显示范围与恢复容差。恢复容差值是指只有所在位置距工作平面的距离小于此容差的几何对象，才认为其位于工作平面上。

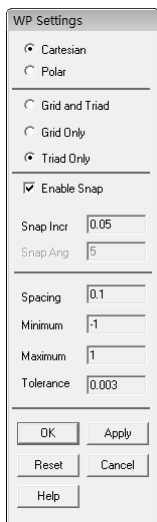


图 2.7 WP Settings 对话框

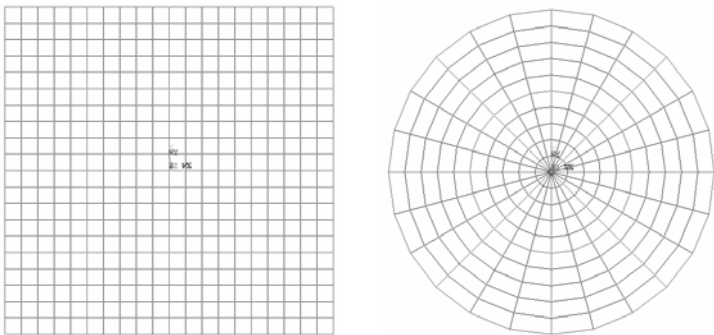


图 2.8 直角坐标系和极坐标系工作平面栅格

2.2.2.3 工作平面的平移和旋转



工作平面是一个流动坐标系，它可以参照自身的坐标系进行平移和转动，在总体坐标系中由一个位置变换到另一位置，由一种方向变换到另一方向。在变换位置和工作平面的中，创建矩形、圆面、长方体等几何对象时，这些几何对象或者其底面将位于变换后的工作平面上，从而可以在总体坐标系空间的任意位置上创建各种规则的几何对象。如果要用工作平面来切分几何线、面和体，则必须将工作平面变换到切开位置上。还有，如果要用工作平面作为镜面映射的对称参考坐标面，那么也需要将工作平面变换到对称轴或者对称平面位置上。


工作平面的平移变换是指沿 WP 的 X、Y、Z 轴移动一定的距离，即 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ，旋转变换是指绕 WP 的 X、Y、Z 轴旋转一定的角度，即 $\Delta \theta_x$ 、 $\Delta \theta_y$ 、 $\Delta \theta_z$ 。归纳起来有 3 种方法，下面分别介绍。

1. 增量变换



增量变换就是按照规定的平移距离值和旋转角度进行工作平面变化。此时,选择 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments 命令,弹出如图 2.9 所示的工作平面增量变换对话框,该对话框主要有两大功能,即工作平面的平移变换和工作平面的旋转变换。


◆ 工作平面的平移变换

用鼠标拖动 Snaps 选项的滚动条 , 可设置平移一次的增量 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 的大小,然后单击按钮  中的任意一个,可将工作平面沿 X-、X+、Y-、Y+、Z-、Z+ 方向平移 Snaps 选项设置的增量大小,即距离。

用户也可以直接在 X,Y,Z Offsets 输入框  中按顺序输入工作平面平移的 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 的数值,3 个数值之间用逗号隔开,然后单击 OK 按钮或 APPLY 按钮,即可按照规定的平移数值执行平移操作。例如,输入“-5, 10, 20”表示工作平面沿 X 轴平移-5 个单位,沿 Y 轴平移 10 个单位,沿 Z 轴平移 20 个单位。

◆ 工作平面的旋转变换

用鼠标拖动 Degrees 选项的滚动条 , 可设置旋转一次的增量 $\Delta \theta_x$ 、 $\Delta \theta_y$ 、 $\Delta \theta_z$ 的大小,然后单击按钮  中的任意一个,可将工作平面绕 X 轴顺时针 (X-)、X 轴逆时针 (X+)、Y 轴顺时针 (Y-)、Y 轴逆时针 (Y+)、Z 轴顺时针 (Z-)、Z 轴逆时针 (Z+) 方向旋转 Degrees 选项设置的增量大小,即角度。

用户也可以直接在 XY,YZ,ZX Offsets 输入框  中按顺序输入工作平面旋转的 $\Delta \theta_z$ 、 $\Delta \theta_x$ 、 $\Delta \theta_y$ 的数值,3 个数值之间用逗号隔开,然后单击 OK 按钮或 APPLY 按钮,即可按照规定的旋转数值执行旋转操作。例如,输入“-30, 60, 90”表示工作平面绕 Z 轴顺时针旋转 30 度,绕 X 轴逆时针旋转 60 度,绕 Y 轴逆时针旋转 90 度。

2. 中心平移变换

中心平移变换是指工作平面发生平移变换操作,且工作平面的原点从当前位置平移到选中的一系列位置、关键点或节点的形心上,或者直接平移到总体坐标系原点或激活坐标系的原点上。工作平面的中心平移变换是工作平面变换经常使用的变换方法,特别是已经创建了一部分几何模型或者网格模型时,可以直接利用已有的节点、关键点、坐标系等进行快速平移变换。

- ◆ 将工作平面平移到选中的多个关键点的形心上。选择 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP to→Keypoints 命令,弹出拾取关键点对话框,如图 2.10 所示。用鼠标选中一个或多个关键点,然后单击 OK 按钮,则可将工作平面进行平移变换,且原点位于选中关键点的中心位置。



如果选中一个关键点,则工作平面直接平移到这个关键点上;如果选中两个关键点,则工作平面平移到这两个关键点的形心(直线的中心)上;如果选中三个关键点,则工作平面平移到这三个关键点的形心(三角形的形心)上;如果选中四个关键点,则工作平面平移到这四个关键点的形心(四边形的形心)上,其他情况依此类推。

- ◆ 选择 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP to→Nodes 命令,可以将工作平面平移到选择

的多个节点的形心上。选择其他命令，还可以将工作平面平移到选择的多个位置点的形心上、或者平移到总体坐标系的原点上、或者平移到当前激活坐标系的原点上（此时当前坐标系可以是激活的总体坐标系，也可以是激活的某个局部坐标系），读者可自行尝试。

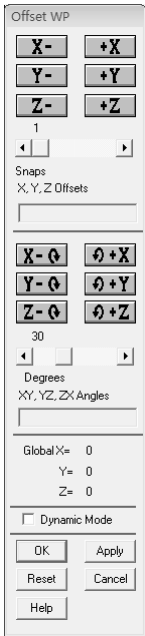


图 2.9 工作平面平移与旋转

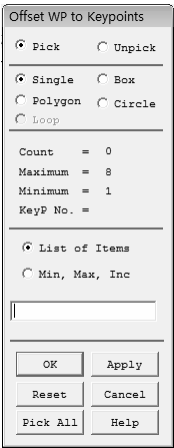


图 2.10 拾取关键点对话框

3. 对齐变换

对齐变换是指将工作平面的原点、三坐标轴的位置和方向固定到某个位置点或者方向上。对齐变换操作分为以下 3 种情况。

- ◆ 利用已有的 3 个关键点、3 个节点或 3 个位置点确定 WX-O-WY 平面，并且 3 个点的选择顺序依次为工作平面的原点、WX 轴方向和 WY 轴方向，WZ 轴通过右手法则自动确定，命令分别为 KWPLAN、NWPLAN 和 WPLAN，可以通过选择 Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→Keypoints 命令来实现。
- ◆ 将工作平面变换到垂直于选择的线，且工作平面的原点位于直线上选中的位置，命令为 LWPLAN，可以通过选择 Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→Plane Normal to Line 命令来实现。
- ◆ 使工作平面变换成与指定的坐标系完全重合，命令为 WPCSYS，可以通过选择 Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→Active Coord Sys 命令来实现。

2.3 自底向上建模

自底向上进行实体建模时，用户从最低级的图元向上构造模型，即先建立点，再由点连成线，然后由线组合成面，最后由面组合成体。有限元模型的顶点在 ANSYS 中通常称为关键点（Keypoint），关键点是实体模型中最低级的图元。

2.3.1 定义关键点及操作

关键点是指在绘图区中的一个几何点，它本身不具有物理属性。实体模型建立时，关键点是最大的图元对象。ANSYS 程序提供了多种定义关键点的方法，下面结合实际操作介绍一些常用方法。

2.3.1.1 定义单个关键点

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 命令，弹出如图 2.11 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。以当前激活坐标系为参考系，输入关键点的坐标，如 (5, 0, 0)，单击 OK 按钮，则 1 号关键点被创建。

还可以在工作平面中定义关键点，选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→On Working Plane 命令，弹出如图 2.12 所示的 Create KPs on WP 对话框。此时直接在视图窗口中单击，即可定义关键点。如果想要准确确定关键点的位置，也可以在如图 2.12 所示的对话框中选中 WP Coordinates 单选按钮，然后在文本框中输入关键点在工作平面上的坐标，如 (3, 5)，然后单击 OK 按钮，则 2 号关键点被创建。

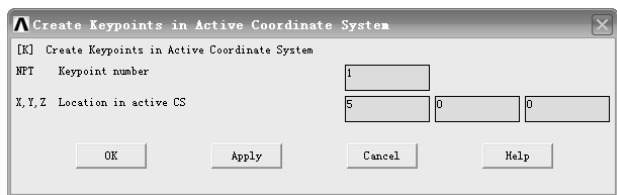


图 2.11 在活动坐标系中定义关键点

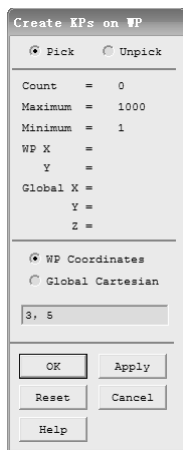


图 2.12 在工作平面上定义关键点

2.3.1.2 在已知线上给定位置定义关键点

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→On Line 命令，弹出图形选取对话框，用鼠标在视图窗口中单击选中刚才生成的线，然后单击 OK 按钮，接着弹出 Create KP by Filling between KPs 对话框，此时在线上任一点单击鼠标，即可在单击的位置生成一个关键点。

2.3.1.3 在已有关键点之间生成关键点

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Fill between KPs 命令，弹出图形选取对话框，用鼠标在图形视窗中依次选择关键点 1 和 2，单击 OK 按钮，弹出 Create KP by Filling between KPs 对话框，输入参数，然后单击 OK 按钮关闭对话框即可。

2.3.1.4 在由三点定义的圆弧的中心生成一个关键点

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→KP at Center→3 Keypoints

命令，弹出图形选取对话框，用鼠标在图形视窗中依次选择关键点 1、2 和 3，然后单击 OK 按钮确认。这时将在 3 个关键点所在的圆弧中心处生成新的关键点 4，最后生成的关键点如图 2.13 所示。

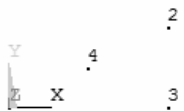


图 2.13 关键点定义



这里要求 3 个关键点不在同一条线上，否则会弹出错误对话框。

2.3.2 定义线及操作

线主要用于表示物体的边。和关键点一样，线是在当前激活的坐标系内定义的，直角坐标系下定义的为直线，圆柱坐标系下定义的是曲线，线的定义方法也有很多种。

2.3.2.1 在关键点之间生成直线或三次曲线

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord 命令，弹出图形选取对话框，用鼠标依次在图形视窗中选择关键点 1 和 2，即生成一条线 L1，这是在默认的笛卡尔坐标系下完成的。

如果改在柱坐标系下进行同样的操作，选择 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cylindrical 命令，改变当前活动坐标系为柱坐标系，然后选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord 命令，弹出图形选取对话框，依次在视窗中选择两个关键点，即可生成一条弧线。

2.3.2.2 通过两个关键点外加一个半径生成一条弧线

选择 Main Menu→Preprocessor→Create→Arcs→By End KPs & Rad 命令，弹出图形选取对话框，用鼠标在图形视窗中选择圆弧的起止点，再选择某关键点，表明圆弧在哪一侧生成，单击 OK 按钮确认，会弹出如图 2.14 所示的对话框。在 Radius of the arc 文本框中输入弧线半径，即可生成如图 2.15 所示的弧线。

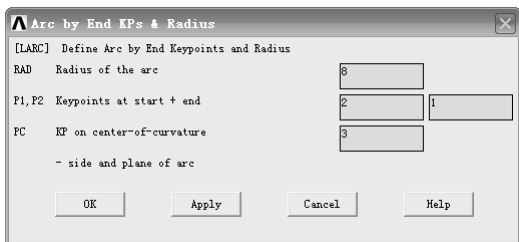


图 2.14 通过指定端点和半径建立弧线

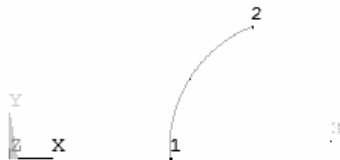


图 2.15 弧线的生成

2.3.2.3 生成圆弧线

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Arcs→By Cent & Radius 命令，弹出图形选取对话框，用鼠标在图形视窗中选择一个关键点作为圆弧的圆心，再在图形视窗中任意选定一点，定出圆弧的半径和起始点，然后单击 OK 按钮，弹出如图 2.16 所示的对话框。在相应的文本框中输入圆弧度数及分成的弧段数，单击 OK 按钮确认，得到的圆弧如图 2.17 所示。要生成一条整圆线，可以选择 Main Menu→Preprocessor→Create→Arcs→Full Circle 命令。

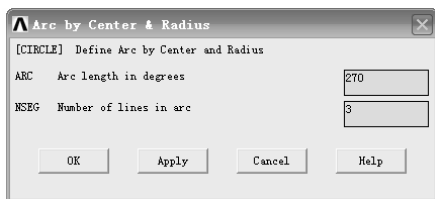


图 2.16 生成圆弧线

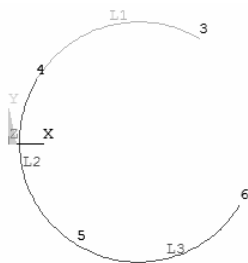


图 2.17 通过圆心和半径生成圆弧线

ANSYS 还有其他一些生成线的方法，读者可依次选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines 菜单下的各个命令来实现。

2.3.3 定义面及操作

实体模型建立时，面为体的边界。面的建立可由关键点直接相接或由线围接而成，并构成具有不同数目的边的面。在 ANSYS 中定义面的方法很多，下面结合实际操作介绍一些常用方法。

2.3.3.1 通过关键点定义一个面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Arbitrary→Through KPs 命令，弹出图形选取对话框，用鼠标在图形视窗中选择建立好的关键点，再单击 OK 按钮即可，如图 2.18 所示。

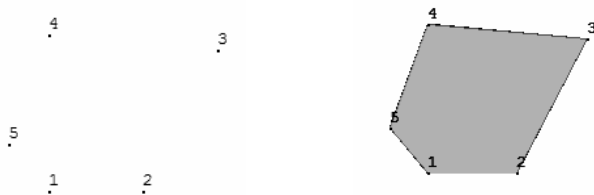


图 2.18 由点生成面



关键点必须以顺时针或逆时针顺序输入。

2.3.3.2 通过边界线定义一个面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Arbitrary→By Lines 命令，弹出图形选取对话框，在图形视窗中选择已经定义好的边界线，再单击 OK 按钮即可。ANSYS 还有其他一些

生成面的方法，读者可自行操作练习。



若需生成的偏移面的曲率半径大于或等于最小许可曲率半径，则该操作失败，用户将收到一个警告信息。

2.3.4 定义体及操作

体为最高图元，最简单的体定义由关键点或面组合而成。由关键点组合时，最多由 8 个点形成六面体，8 个点的顺序为相应面的顺时针或逆时针顺序皆可，其所属的面、线会自动生成。以面组合时，最多为 10 个面围成的封闭体。也可由原始对象建立，如圆柱、长方体、球体等可直接建立。在 ANSYS 中定义体的方法很多，下面结合实际操作介绍一些常用的方法。

2.3.4.1 通过关键点定义体

选择 Main Menu→Preprocessor→Create→Volumes→Arbitrary→Through KPs 命令，弹出图形选取对话框，依次选取关键点，则原有的关键点即成为体的角点。

2.3.4.2 通过边界面定义体

选择 Main Menu→Preprocessor→Create→Volumes→Arbitrary→Through Areas 命令，弹出图形选取对话框，依次选择面，则原有的面将成为体的边界面。这里至少需要输入 4 个面才能围成一个体，面编号可以任何次序输入，只要这组面能围成封闭的体即可。

2.3.4.3 将面沿某个路径拖拉生成体

选择 Main Menu→Preprocessor→Operate→Extrude→Along Lines 命令，弹出图形选取对话框，然后选择待拉伸的面，单击 OK 按钮，再选择拉伸路径，最后单击 OK 按钮确认即可。

2.4 自顶向下建模

自顶向下建模是利用 ANSYS 内部已经存在的常用实体轮廓（体素），如矩形面、圆形面、六面体和球体等，直接生成用户想要的模型。因为这些体素都是高级图元，当生成这些高级图元时，ANSYS 会自动生成所有必要的低级图元，包括关键点。

2.4.1 面对象的建立

面对象包括矩形、圆形和正多边形。

2.4.1.1 建立矩形面对象

1. 在工作平面上任意位置生成一个长方形面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions 命令，弹出如图 2.19 所示的对话框。在 X-coordinates 文本框中分别输入左下角点和右上角点的 X 坐标；在 Y-coordinates 文本框中分别输入左下角点和右上角点的 Y 坐标，再单击 OK 按钮确认即可。

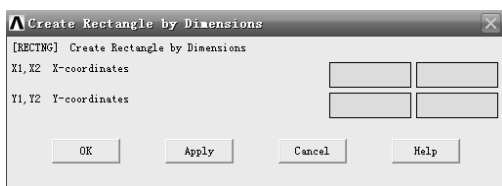


图 2.19 通过定义角点创建矩形

2. 通过定义矩形的角点与边长生成矩形面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By 2 Corners 命令，弹出 Rectangle by 2 Corners 对话框，在 WP X 和 WP Y 文本框中输入矩形某角点在工作平面下的 X 坐标和 Y 坐标，在 Width 文本框中输入矩形的宽，在 Height 文本框中输入矩形的高，然后单击 OK 按钮即可。

3. 通过中心和角点生成矩形面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Center&Corner 命令，在弹出的对话框中输入相应参数，然后单击 OK 按钮即可。

2.4.1.2 建立圆面或环形面对象

1. 生成以工作平面原点为圆心的圆（环）形面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle→By Dimensions 命令，弹出如图 2.20 所示的 Circular Area by Dimensions 对话框。在 Outer radius 文本框中输入圆的外径值，在 Optional inner radius 文本框中输入圆的内径值，在 Starting angle 文本框中输入起始角度，在 Ending angle 文本框中输入终止角度。单击 OK 按钮，得到的圆环如图 2.21 所示。

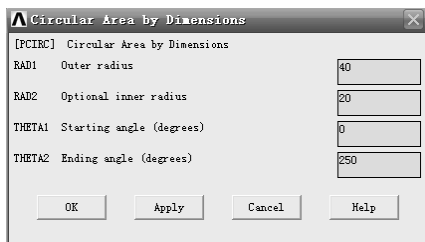


图 2.20 以工作平面原点为圆心定义圆环

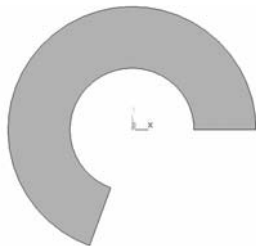


图 2.21 生成的圆环

2. 在工作平面任意位置生成圆（环）形面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle→Partial Annulus 命令，弹出如图 2.22 所示的对话框。在 WP X 和 WP Y 文本框中分别输入圆心的 X 和 Y 坐标，在 Rad-1 和 Rad-2 文本框中分别输入圆的内径和外径，在 Theta-1 和 Theta-2 文本框中分别输入圆的起始和终止角度，然后单击 OK 按钮。

如果要生成整个圆环，可选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle→Annulus 命令；要创建实心圆，可选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle→Solid Circle 命令，其操作和创建部分圆环类似。

3. 通过端点生成一个圆形面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circle→By End Points 命令，弹出如图

2.23 所示的对话框。在 WP XE1 和 WP YE1 文本框中分别输入一个端点的 X 和 Y 坐标，在 WP XE2 和 WP YE2 文本框中分别输入另一个端点的 X 和 Y 坐标，则以这两点为直径的圆就唯一确定了，单击 OK 按钮即可。

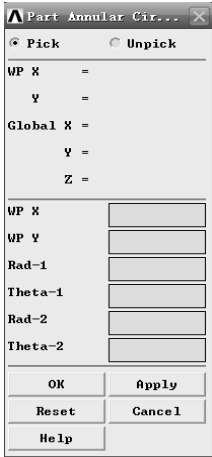


图 2.22 在工作平面创建部分圆环

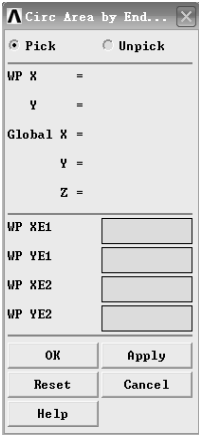


图 2.23 通过端点生成圆

2.4.1.3 建立正多边形面对象

1. 以工作平面的原点为中心生成一个正多边形面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→By Inscribed Rad 命令，弹出如图 2.24 所示的对话框。在 Number of sides 文本框中输入多边形的边数，在 Minor (inscribed) radius 文本框中输入多边形内切圆的半径，再单击 OK 按钮即可，生成的效果如图 2.25 所示。

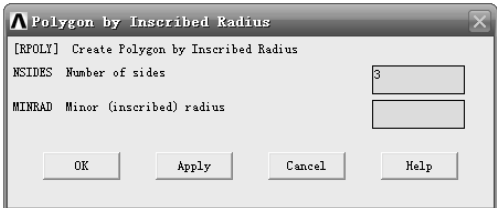


图 2.24 以工作平面的原点为中心生成多边形面

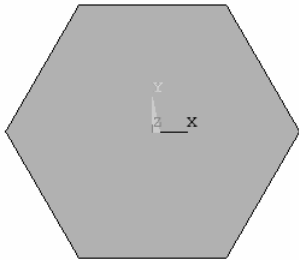


图 2.25 生成的六边形面效果

如果用户想按多边形的外接圆半径创建多边形面，可选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→By Circumscr Rad 命令；若要按多边形的边长来创建多边形，可选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→By Side Length 命令。

2. 在工作平面的任意位置处生成一个正多边形面

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Polygon→Hexagon 命令，弹出如图 2.26 所示的对话框。在 WP X 和 WP Y 文本框中分别输入多边形中心的 X 和 Y 坐标，在 Radius 文本框中输入外接圆的半径，在 Theta 文本框中输入方向角，然后单击 OK 按钮，即可生成一个中心位于 (30, 0) 的正六边形。生成其他正多边形的方法读者可自行尝试。



- (1) 由命令或 GUI 途径生成的面位于工作平面上，方向由工作平面坐标系决定。
 (2) 所定义的面面积一定大于 0，不能退化面来定义线。

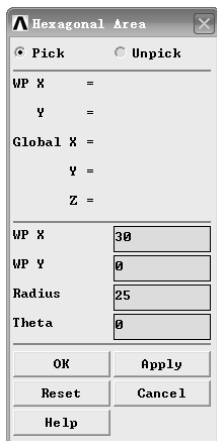


图 2.26 在工作平面任意位置创建正多边形

2.4.2 体对象的建立

体对象包括长方体、圆柱、棱柱、球、锥体和环体等。

2.4.2.1 建立长方体对象

1. 通过对角点生成长方体

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions 命令，弹出如图 2.27 所示的对话框。在 X-coordinates、Y-coordinates 和 Z-coordinates 文本框中输入两个对角的 X、Y、Z 坐标，再单击 OK 按钮即可。

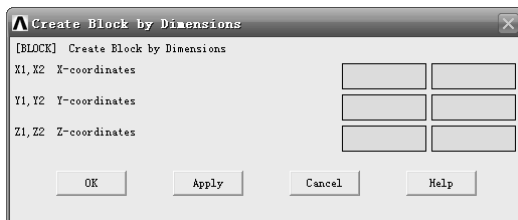


图 2.27 通过角点生成长方体

2. 通过底面的两个角点和高生成长方体

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By 2 Corners & Z 命令，在弹出的对话框中输入一个角点的坐标和长宽高，单击 OK 按钮即可。

3. 通过中心及角点生成长方体

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Center, Corners, Z 命令，在弹出的对话框中输入底面中心的坐标和长、宽、高，单击 OK 按钮即可。

2.4.2.2 建立柱体对象

1. 以工作平面的原点为圆心生成圆柱体

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By Dimensions 命令，弹出如图 2.28 所示的对话框。在 Outer radius 文本框中输入圆柱体的外径值，在 Optional inner radius 文本框中输入圆柱体的内径值（默认为 0），在 Z-coordinates 文本框中输入圆柱顶面与底面的 Z 坐标，在 Starting angle 和 Ending angle 文本框中分别输入圆柱截面的起止角度，再单击 OK 按钮即可。

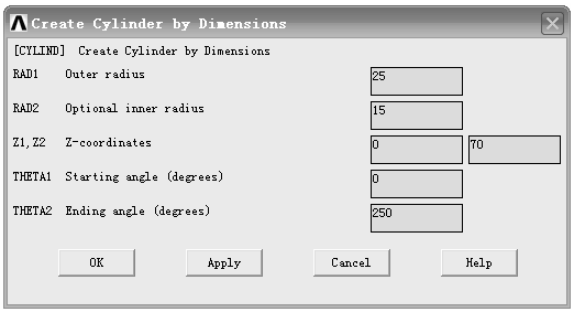


图 2.28 以工作平面原点为圆心生成圆柱体

2. 在工作平面任意位置生成圆柱体

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Hollow Cylinder 命令，弹出如图 2.29 所示的对话框。在 WP X 和 WP Y 文本框中输入圆柱底面中心的 X 坐标和 Y 坐标（工作平面下），在 Rad-1 和 Rad-2 文本框中分别输入圆柱的内外径，在 Depth 文本框中输入圆柱的高，然后单击 OK 按钮即可。

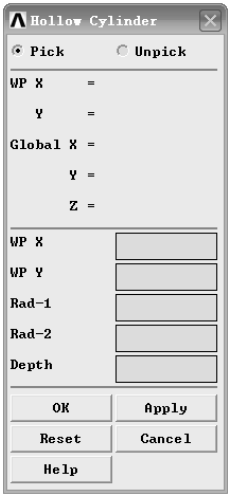


图 2.29 在工作平面任意位置生成圆柱体

3. 通过端点生成圆柱体

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By End Pts & Z 命令，弹出图形选取对话框，选择两个端点以定义圆柱截面直径，再选择高来定义圆柱。

2.4.2.3 建立多棱柱体对象

1. 以工作平面的原点为圆心生成正棱柱

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→By Circumscr Rad 命令，弹出如图 2.30 所示的对话框。在 Z-coordinates 文本框中输入棱柱的顶面和底面的 Z 坐标，在 Number of sides 文本框中输入截面边数，在 Major (circumscr) radius 文本框中输入截面外接圆的半径，再单击 OK 按钮即可。

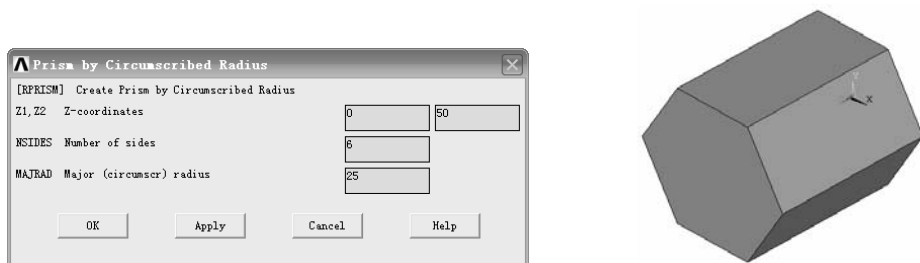


图 2.30 在工作平面生成正棱柱

2. 在工作平面任意位置生成多棱柱

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism→Hexagonal 命令，可以生成正六棱柱。同理，选择菜单中的其他命令，还可以生成正八棱柱、正五棱柱、正七棱柱、立方体等，读者可自行尝试。

2.4.2.4 建立球体或部分球体对象

要以工作平面原点为中心生成球体，可选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Sphere→By Dimensions 命令，弹出如图 2.31 所示的对话框。在 Outer radius 文本框中输入球的外径值，在 Optional inner radius 文本框中输入球的内径值，在 Starting angle 文本框中输入起始角度，在 Ending angel 文本框中输入终止角度，再单击 OK 按钮即可。

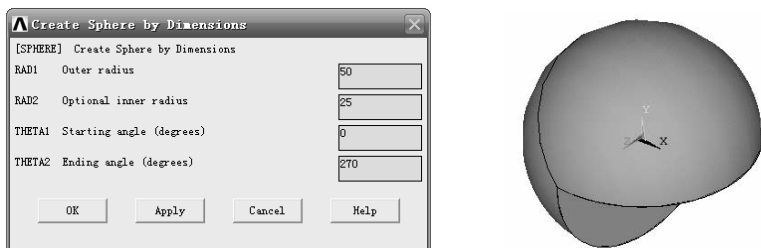


图 2.31 以工作平面原点为中心生成球体

要以直径的端点来生成球体，可选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Sphere→By End Point 命令，弹出图形选取对话框，选择两个端点以通过定义球截面直径来生成球体。

2.4.2.5 建立椎体或圆台对象

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cone→By Dimensions 命令，弹出如图 2.32 所示的对话框。在 Bottom radius 文本框中输入底面半径，在 Optional top radius

文本框中输入顶面半径 (默认为 0), 在 Z-coordinates 文本框中分别输入底面和顶面的 Z 坐标, 在 Starting angle 和 Ending angle 文本框中分别输入圆台的起止角度, 再单击 OK 按钮即可。

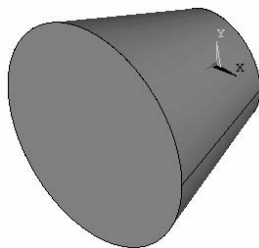
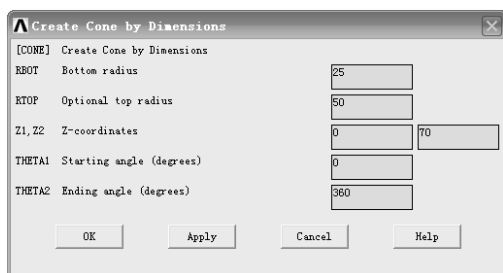


图 2.32 以工作平面原点为中心生成圆台

2.4.2.6 建立环体或部分环体对象

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Torus 命令, 弹出如图 2.33 所示的对话框。在 Outer radius 文本框中输入圆环的外径值, 在 Optional inner radius 文本框中输入圆环的内径值, 在 Major radius of torus 文本框中输入圆环的主半径, 在 Starting angle 和 Ending angle 文本框中分别输入圆环的起止角度, 再单击 OK 按钮即可。

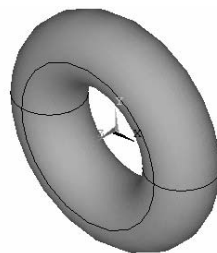
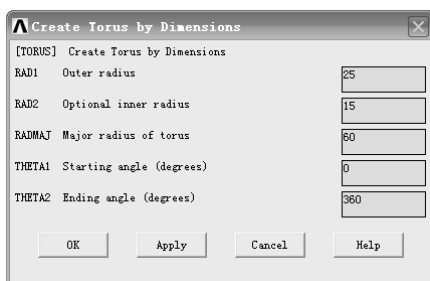


图 2.33 生成圆环



上述操作定义的体都是相对于工作平面的。

2.5 布尔运算与模型修改

ANSYS 程序提供了完整的布尔运算, 如相加、相减、相交、分割、粘结和重叠等。在创建复杂实体模型时, 对线、面、体、基元的布尔操作能减少相当可观的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动、延伸和复制实体模型图元等模型修改功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造、通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相交运算、自动倒角生成、用于网格划分的硬点的建立、移动、复制和删除。本节将重点介绍 ANSYS 程序的布尔运算和模型修改功能。

2.5.1 布尔运算

布尔运算就是对生成的实体模型进行交、并、减等逻辑运算处理, 使用户能快速生成复杂的实体模型。无论是自顶向下还是自底向上建立的实体模型, 都可以对其进行布尔运算, 但通过连接生

成的图元对布尔运算无效。如果用布尔运算修改了已有的模型, 应该注意, 要重新进行单元属性和载荷的定义。ANSYS 中常用的布尔运算有交运算、加运算、减运算、工作平面减运算、搭接、分割及粘合。

2.5.1.1 设置布尔运算

要对布尔运算进行设置, 可选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Settings 命令, 弹出如图 2.34 所示的对话框, 在该对话框中进行相应设置即可。

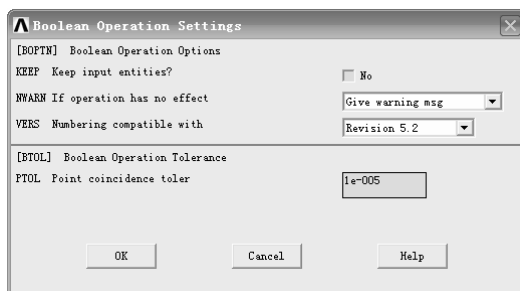


图 2.34 布尔运算设置

对两个或多个图元进行布尔运算时, 需要用户确定是否保留原始图元。若要保留, 则使图 2.34 所示的对话框中的 Keep input entities 右边的框显示为 Yes 即可。



布尔运算的几何对象以及相连的所有几何对象必须没有划分单元网格, 如果已经划分了单元网格, 必须先清除网格。

2.5.1.2 交运算

交运算是由每个初始图元的共同部分形成一个新的图元。

以线与线相交为例, 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect→Common→Lines 命令, 弹出如图 2.35 所示的图形选取对话框, 选择适当的图形选取方式, 然后在图形视窗中选择要进行交运算的线, 再单击 OK 按钮确认, 交运算的结果如图 2.35(右)所示。其他的交运算操作与此类似, 故不再赘述。



图 2.35 线与线相交

2.5.1.3 加运算

加运算就是将两个或多个实体合并, 然后生成一个新的实体, 包括线线相加、面面相加和体体

相加。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→ADD→Lines 命令，可以进行线与线相加，面与面相加、体与体相加的操作与此类似，读者可自行尝试。

2.5.1.4 减运算

减运算就是从一个实体上删除和另外一个实体相重合的部分，然后生成一个或多个新的实体，包括线线相减、面面相减和体体相减。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Lines 命令，可以进行线与线相减，面与面相减、体与体相减的操作与此类似，读者可自行尝试。

2.5.1.5 搭接运算

搭接运算的功能是将两个或多个图元连接，以生成三个或多个新的图元。搭接运算在搭接域周围与加运算非常类似，搭接运算生成的是多个相对简单的区域，而加运算生成的是一个相对复杂的区域。因此，搭接运算生成的图元比加运算生成的图元更容易进行网格划分。搭接的操作方法和其他运算类似，选择相应的菜单命令，弹出图形选取对话框，选择要进行搭接运算的图元，再单击 OK 按钮即可。在 ANSYS 中可以进行线与线搭接、面与面搭接、体与体搭接的操作，读者可自行尝试。



搭接部分与原图元的级数必须相同，搭接运算才能生效。

2.5.1.6 粘结运算

粘结命令的功能与搭接类似，只是图元之间仅在公共边界相关，且工作边界的图元等级低于原始图元。进行粘结运算后的图元仍保持相互独立，它们只是在交界处共用低级图元。如线线粘结，结果是两线在交界处共用一个关键点。粘结运算的操作方法和其他运算类似，选择相应的菜单命令，弹出图形选择对话框，依次选择要进行运算的图元，再单击 OK 按钮即可。在 ANSYS 中可以进行线与线粘结、面与面粘结、体与体粘结的操作，读者可自行尝试。

2.5.1.7 分割运算

分割运算的功能是将一个图元进行分割，生成两个或更多新的图元集合。如果分割区域与原始图元有相同的等级，则分割结果与搭接结果相同，但分割运算不会删除与其他图元没有重叠部分的图元。分割运算的操作方法和其他运算类似，选择相应的菜单命令，弹出图形选取对话框，依次选择要进行运算的图元，再单击 OK 按钮即可。在 ANSYS 中可以进行线分割线、面分割面、体分割体的操作，读者可自行尝试。

2.5.2 模型修改

图元生成后，常常需要对其进行适当的编辑和修改。ANSYS 提供了对图元进行移动、复制、镜像和缩放等编辑功能。这样就不需要每次都从头开始生成图元，而可以在已经创建的复杂图元（如通过布尔运算得到的图元）的基础上进一步编辑。

2.5.2.1 移动图元

在自顶向下建模的过程中,有些命令只能直接在工作平面的原点处生成相应的图元。如果用户对图元的形体构造满意,但想把图元放到其他位置上,就可以考虑使用移动图元的操作。可以先生成模型,再将其移动到合适的位置。下面以移动一个圆面为例来介绍移动图元的操作步骤。

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Solid Circle 命令,在弹出的对话框中进行相应设置,在工作平面原点处生成一个半径为 8 的圆面。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move/Modify→Areas→Areas 命令,弹出图形选取对话框,在视图窗口中选择上一步中生成的圆面,单击 OK 按钮,弹出如图 2.36 所示的对话框。

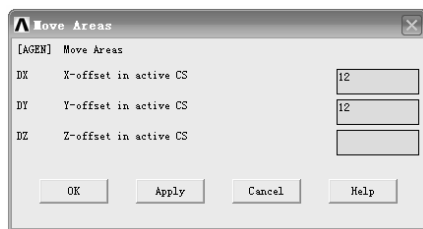


图 2.36 面移动增量设置

step 3 在 X-offset in active CS 和 Y-offset in active CS 文本框中均输入 12,设置面在当前活动坐标系中的移动增量,单击 OK 按钮确认。移动后的圆面如图 2.37 所示。

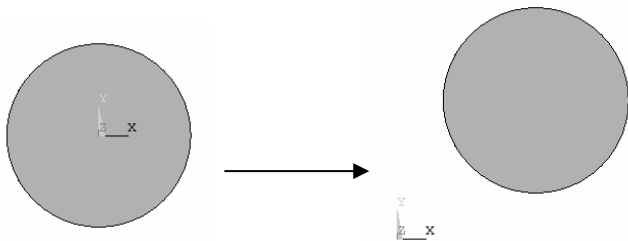


图 2.37 面的移动

2.5.2.2 复制图元

当建模过程中想要多次利用某一图元时,可以使用复制功能。只需先生成一次图元,然后在需要的位置或方向上复制即可。例如,选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Keypoints 命令可以复制关键点,其余命令在此不再详述。



复制高级图元时,附属于其上的低级图元将一起被复制。

2.5.2.3 镜像图元

对于一些本身对称的模型,可以先生成一部分模型,再通过镜像功能生成模型的另一部分,这对于复杂的模型非常有用。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Keypoints 命令可以镜像关键点。同理可以镜像线、面、体等元素。

2.5.2.4 缩放图元

已经生成的图元还可以放大或缩小。ANSYS 用当前活动坐标系的坐标轴方向来定义图元缩放的方向。例如，选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Scale→Areas 命令可以对面进行缩放操作。

2.5.2.5 转换图元坐标系

当需要把图元从一个坐标系转换到另一个坐标系时，可以使用 ANSYS 中的转换图元坐标系功能。例如，选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move/Modify→Transfer Coord→Volumes 命令，可以对体进行坐标系转换。

2.6 网格属性与划分控制

除直接生成有限元模型外，所有实体模型在进行分析求解前，必须先对其划分网格，生成有限元模型。ANSYS 程序提供了使用便捷、高质量的对几何模型进行网格划分的功能。基本的划分过程分为 3 个步骤：定义单元类型及属性、定义网格划分控制、生成网格。

2.6.1 定义单元类型及属性

在划分网格之前，通常需要指定分析对象的特征，即定义单元类型，主要包括单元类型及单元类型属性定义、实常数定义和材料属性定义。

2.6.1.1 单元类型及属性定义

ANSYS 程序提供了 200 余种单元以用于工程分析，经常使用的单元有以下几类。

- ◆ **杆单元**：用于弹簧、螺杆及桁架等模型。
- ◆ **梁单元**：用于螺栓、管件、型材及钢架等模型。
- ◆ **面单元**：用于各种二维模型或可简化为二维的模型。
- ◆ **壳单元**：用于薄板或曲面模型（板面厚度小于其板面尺寸的 1/10）。
- ◆ **实体单元**：用于各种三维实体模型。

可以选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令来定义单元类型。选择该命令后，弹出如图 2.38 所示的单元类型列表对话框，可在该对话框中选择相应的单元类型。

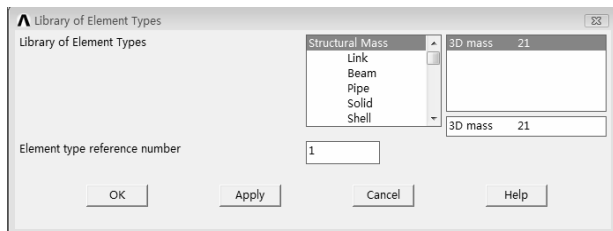


图 2.38 单元类型列表对话框

选择单元的基本原则是在满足求解精度的前提下尽量采用低维的单元，即选择单元优先级从高到低依次为点、线、面、壳、实体。

可以选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs 命令，设置默认属性；也可以选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→All Keypoints 命令，给关键点分配属性。给线、面、体分配属性的操作读者可自行尝试。

2.6.1.2 实常数定义

单元实常数通常包括杆、梁单元的横截面面积，板、壳单元的厚度，惯性矩，平面单元的轴对称特性、单元的初始预应力条件等。选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constant→Add/Edit/Delete 命令，LINK1 单元的实常数对话框如图 2.39 所示。

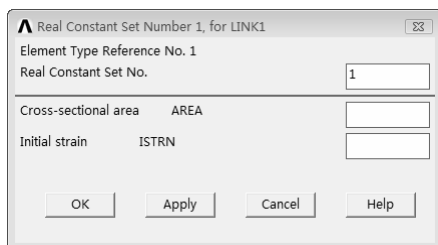


图 2.39 LINK1 单元的实常数对话框

2.6.1.3 材料属性定义

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Model 命令，弹出材料属性定义对话框，如图 2.40 所示。用户可在此对话框中选择相应的材料模型。ANSYS 为用户提供了 100 余种材料模型以供使用。

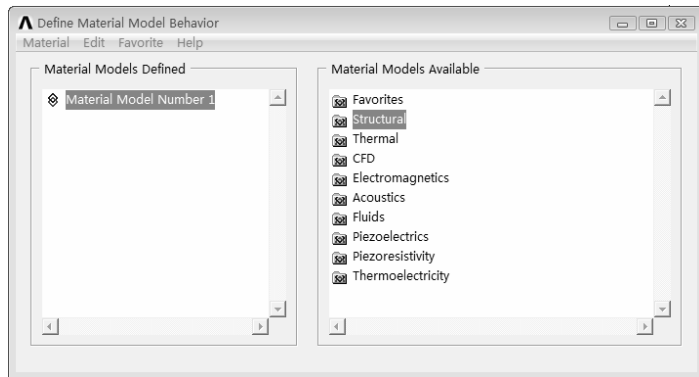


图 2.40 材料属性定义对话框

2.6.2 网格划分工具

ANSYS 提供了一个强大的网格划分工具栏，该工具栏中包括单元属性选择、单元尺寸控制、自由划分与映射划分等网格划分可能用到的所有命令，使用户可以方便地进行常用的网格划分控制的参数设置。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 命令，即可打开网格划分工具对话框，如图 2.41 所示。该对话框可设置的各项属性如下。

- ◆ **设置单元属性。**在 Element Attributes 下拉列表框中可以选择 Global、Volumes、Areas、

Lines 或 Keypoint 选项进行属性设置。选择 Global 选项，单击 Set 按钮，将弹出如图 2.42 所示的 Meshing Attributes 对话框，可在该对话框中设置对应的单元类型、材料属性、实常数、坐标系及单元截面（如果定义了 BEAM 单元或 SHELL 单元，才会有单元截面项）。

- ◆ **Smartsize 网格划分控制。**只有当 Smart Size 复选框选中时，Smart Size 选项才打开。用户可以通过拖动下方的滑块来设置 Smartsize 网格划分水平值的大小。Smartsize 值越小，网格划分效果越好。
- ◆ **单元尺寸控制。**在 Size Controls 选项组里，提供了对 Global、Volumes、Areas、Lines 和 Keypoint 进行单元尺寸设置和网格清除的功能。
- ◆ **单元形状控制。**在 Mesh 下拉列表框中可以选择网格划分的对象类型，如 Volumes、Areas、Lines 或 Keypoints。当选择 Areas 选项时，Shape 选项组的内容将变为 Tri（三角形）和 Quad（四边形），可以控制用三角形还是四边形单元对面进行划分；当选择 Volumes 选项时，Shape 选项组的内容将变为 Hex（六面体）和 Tet（四面体），可以控制用六面体还是四面体单元对体进行划分。
- ◆ **网格划分器选择。**可以选中 Free（自由网格划分）或 Mapped（映射网格划分）单选按钮，以决定使用哪个网格划分器进行网格划分。
- ◆ **网格划分优化。**在 MeshTool 对话框的最下方，用户可以在 Refine at 下拉列表框中选择 Nodes、Elements、Keypoints、Lines、Areas 或 All Elems 选项，然后单击 Refine 按钮，开始进行网格细化操作。

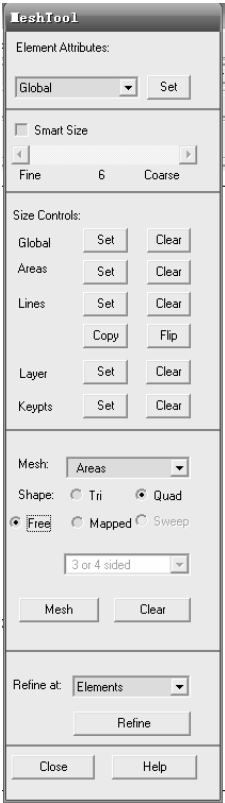


图 2.41 网格划分工具对话框

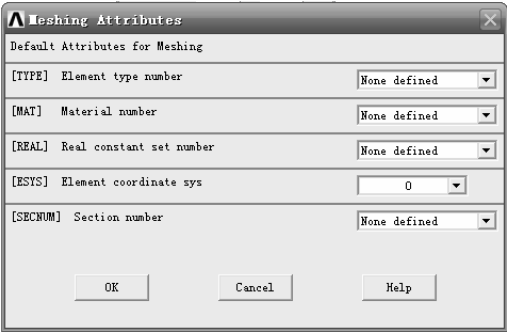


图 2.42 网格划分属性对话框

2.6.3 Smartsize 网格划分控制

Smartsize 是 ANSYS 提供的强大的自动网格划分工具，它具有自己的内部计算机制。在很多情况下，使用 Smartsize 更有利于在网格生成过程中生成形状合理的单元。在进行自由网格划分时，建议用户使用 Smartsize 控制网格的大小。自由网格划分的具体内容将在 2.7 节进行阐述。

如果用四边形单元来为面划分网格，Smartsize 尽量给每一个面平均分配线数，以使其全部划分为四边形。当网格为四边形时，如果生成的单元形状很差或在边界出现奇异域，应该考虑使用三角形单元。

2.6.3.1 Smartsize 的基本控制

基本控制是指用 Smartsize 的网格划分水平值（从 1 到 10）来控制网格划分大小。程序会自动地设置一套独立的控制值来生成想要的大小，其中默认的网络划分水平是 6。用户可以按自己的需要进行修改。修改的方法为在图 2.41 所示的 MeshTool 对话框中调节 Smart Size 项的滑块。

还可以选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Contrls→SmartSize→Basic 命令，弹出如图 2.43 所示的 Basic SmartSize Settings 对话框。在 Size Level 下拉列表框中，从 1（细）到 10（粗糙）选择一个级别，再单击 OK 按钮即可。



图 2.43 Smartsize 基本控制

2.6.3.2 Smartsize 的高级控制

当用户需要对 Smartsize 作特殊的网格划分设置时，就需要使用高级控制技术了。Smartsize 的高级控制给用户提供了人工控制网格质量的可能，用户可以改变诸如小孔和小角度处的粗化选项等。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Contrls→SmartSize→Adv Opts 命令，将弹出如图 2.44 所示的 Advanced SmartSize Settings 对话框。

其中：

- ◆ FAC 用于计算默认网格尺寸的比例因子，当用户没有使用类似于 ESIZE 的命令对对象划分网格作出特殊制定时，该值的设置直接影响到单元的大小，取值范围为 0.2~5.0。
- ◆ EXPND 为网格划分胀缩因子，该值决定了面内部单元尺寸的比例关系，取值范围为 0.5~4。
- ◆ TRANS 为网格划分过滤因子，该值决定了从面的边界到内部单元尺寸胀缩的速度，该值必须大于 1，而且最好小于 4。
- ◆ ANGL 针对于低阶单元，该值设置了每单元边界过渡中允许的最大跨越角度，ANSYS 默认为 22.5 度（SmartSize 的水平值为 6 时）。

其他参数用默认值即可。

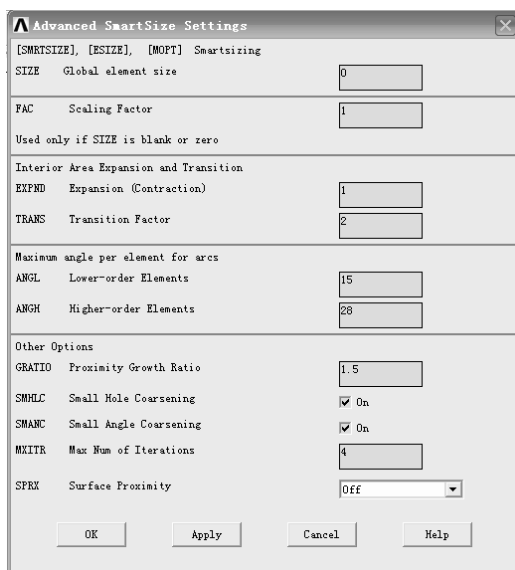


图 2.44 Smartsize 高级控制



当在 MeshTool 对话框中选中 Smart Size 复选框，并拖动滑块进行了 SmartSize 水平设置后，高级控制对话框中的值将自动恢复为默认值。因此，在高级控制对话框中修改了参数后，应马上进行网格划分。

2.6.4 尺寸与形状控制

在 ANSYS 的网格划分工具中提供了专门的尺寸和形状控制工具。

2.6.4.1 尺寸控制

在图 2.41 所示的网格划分工具对话框中提供了专门的单元尺寸控制选项，如图 2.45 所示。它可以对面、线、层和关键点的单元大小进行设置，还可以对全局单元尺寸进行设置。如图 2.46 所示的圆环，其外径和内径分别为 20 和 10。用全局单元尺寸控制其网格划分的操作步骤如下。

- step 1** 建立几何模型。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Annulus 命令，弹出圆环面参数框，输入参数，如图 2.47 所示，单击 OK 按钮，生成的几何模型如图 2.46 所示。
- step 2** 选择单元类型。选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，如图 2.48 所示。单击 Add...按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Solid 中的 Quad 4node 42 单元，如图 2.49 所示，单击 OK 按钮关闭对话框。
- step 3** 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Meshtool 命令，弹出如图 2.41 所示的 MeshTool 对话框，并设置好单元属性。单击 Global 行中的 Set 按钮，弹出 Global Element Sizes 对话框，在 Element edge length 文本框中输入单元大小“3”，如图 2.50 所示，单击 OK 按钮，回到 MeshTool 对话框。



图 2.45 尺寸控制选项

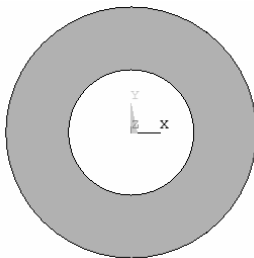


图 2.46 几何模型

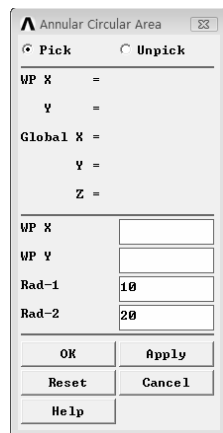


图 2.47 圆环面参数框

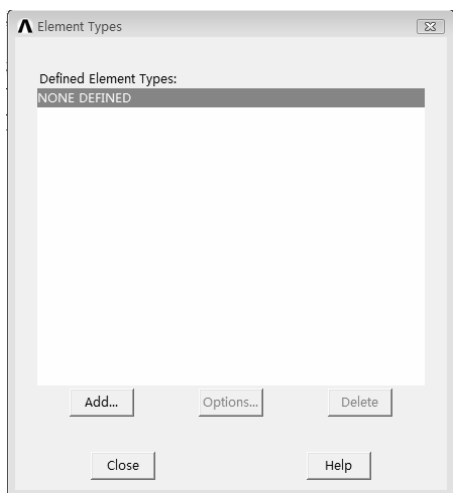


图 2.48 Element Types 对话框

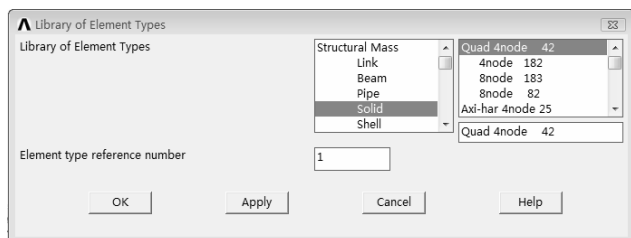


图 2.49 Library of Element Types 对话框

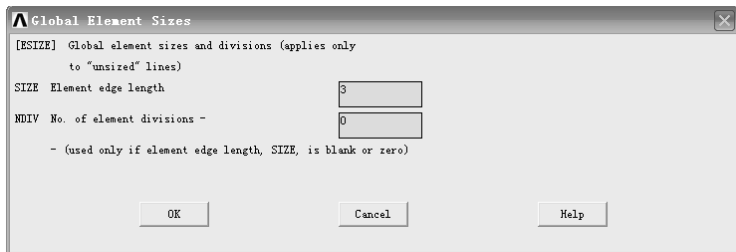


图 2.50 全局单元尺寸设置



要清除全局单元尺寸控制，单击图 2.45 中 Global 右边的 Clear 按钮即可。

step 4

在图 2.41 所示的对话框中，定义单元形状控制为 Quad，网格划分器选择 Free。然后单击 Mesh 按钮，弹出图形选取对话框，再用鼠标在图形视图窗口中选择要划分的圆环，单击 OK 按钮得到划分的网格，如图 2.51 所示。

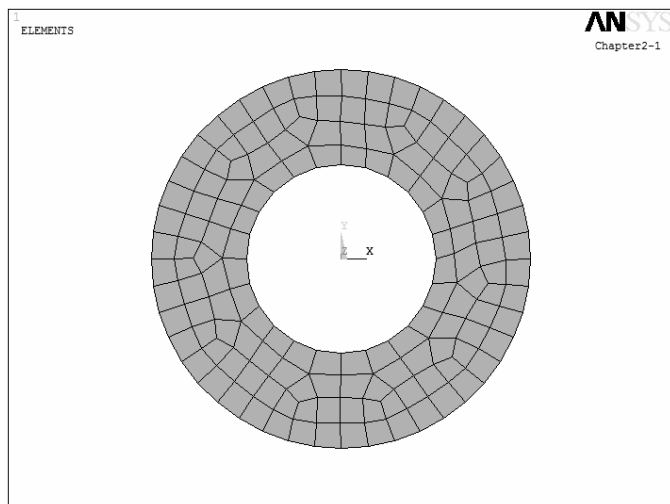


图 2.51 用全局单元尺寸控制网格划分的效果

2.6.4.2 形状控制

同一个网格区域的面单元可以是三角形或四边形，体单元可以是六面体或四面体。因此，在进行网格划分之前，应该决定是使用 ANSYS 对于单元形状的默认设置，还是自己指定单元形状。

当用四边形单元进行网格划分时，结果中还可能包含有三角形单元，这是单元划分过程中产生的单元“退化”现象。比如，PLANE82 单元是二维的结构单元，具有 8 个节点，默认情况下，PLANE82 具有四边形的外形，但当某一边上的 3 个节点定义为同一节点时，原来的四边形单元就“退化”为三角形单元。

当在划分网格前指定单元形状时，不必考虑单元形状是默认的形式还是某一单元的退化形式。相反，可以考虑想要的单元形状本身的最简单形式。用网格划分工具指定单元形状的操作步骤如下。

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 命令，打开如图 2.41 所示的 MeshTool 对话框。

step 2 在 Mesh 下拉列表框中选择需要划分的对象类型。当选择面网格划分时，在 Shape 选项组中选择 Quad（四边形）或 Tri（三角形）单选按钮；当选择网格划分时，可选择 Tet（四面体）或 Hex（六面体）单选按钮。

step 3 单击 **Mesh** 按钮对模型进行网格划分。

2.7 自由网格与映射网格

ANSYS 软件平台提供了自由网格划分（Free）和映射网格划分（Mapped）两种策略。自由网格划分用于空间自由曲面和复杂实体，采用三角形、四边形、四面体进行划分，通过网格数量、边长及曲率来控制网格的质量。而映射划分则是用于曲线、曲面、实体的网格划分方法，可使用三角形、四边形、四面体、五面体和六面体进行划分，通过指定单元边长、网格数量等参数对网格进行严格控制。映射划分只用于规则的几何图素，对于裁剪曲面或者空间自由曲面等复杂几何体则难以

控制。

在进行一般的网格控制之前，用户应该考虑好，是使用自由网格划分还是映射网格划分。自由网格划分对于单元没有特殊的限制，也没有指定的分布模式，而映射网格划分则不但对单元形状有所控制，而且对单元排布模式也有要求。两者划分结果的差别如图 2.52 所示。

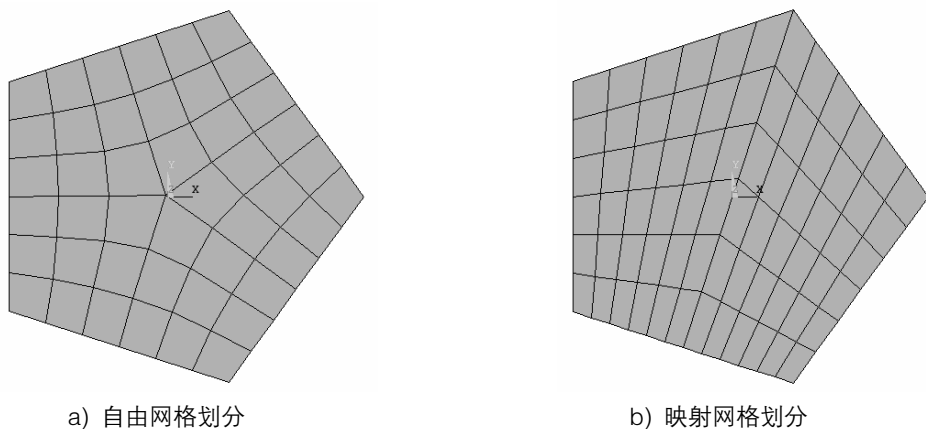


图 2.52 网格划分

2.7.1 自由网格划分

自由网格划分是自动化程度最高的网格划分技术之一，它可以在面上（平面、曲面）自动生成三角形或四边形网格，在体上自动生成四面体网格。通常情况下，可利用 ANSYS 的智能尺寸控制技术（SMARTSIZE 命令）来自动控制网格的大小和疏密分布，也可人工设置网格的大小（AESIZE、LESIZE、KESIZE、ESIZE 等系列命令）并控制疏密分布，以及选择分网算法等（MOPT 命令）。对于复杂几何模型而言，这种分网方法省时省力，但缺点是单元数量通常会很大，计算效率降低。同时，由于这种方法对于三维复杂模型只能生成四面体单元，为了获得较好的计算精度，建议采用二次四面体单元（92 号体单元 SOLID92）。如果选用的是六面体单元，则此方法自动将六面体单元退化为阶次一致的四面体单元，因此，最好不要选用线性的六面体单元（没有中间节点，比如 45 号单元），因为该单元退化后为线性的四面体单元，具有过刚的刚度，计算精度较差；如果选用二次的六面体单元（比如 95 号单元），由于其是退化形式，节点数与其六面体原型单元一致，只是有多个节点在同一位置而已，因此，可以利用 TCHG 命令将模型中的退化形式的四面体单元变化为非退化的四面体单元，减少每个单元的节点数量，提高求解效率。

自由网格划分主要是使用 Smartsize 进行控制，选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 命令，打开 MeshTool 对话框，选择 Free 单选按钮，即可使用自由网格划分模式，如图 2.53 所示。

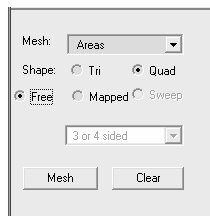


图 2.53 自由网格划分选择模式



使用 MeshTool 的优点在于，用户选择了单元的形状后，ANSYS 会自动将对于此单元形状不可用的网格划分模型的相应按钮置为不可用状态。

2.7.2 映射网格划分

映射网格划分是对规整模型的一种规整网格划分方法，其原始概念是：对于面，只能是四边形面，网格划分数需在对边上保持一致，形成的单元全部为四边形；对于体，只能是六面体，对应线和面的网格划分数保持一致，形成的单元全部为六面体。在 ANSYS 中，这些条件有了很大的放宽，包括：

- ◆ 面可以是三角形、四边形，或其他任意多边形。对于四边以上的多边形，必须用 LCCAT 命令将某些边联成一条边，以使得对于网格划分而言，仍然是三角形或四边形；或者用 AMAP 命令定义 3 到 4 个顶点（程序自动将两个顶点之间的所有线段联成一条）来进行映射划分。
- ◆ 面上对边的网格划分数可以不同，但有一些限制条件。
- ◆ 面上可以形成全三角形的映射网格。
- ◆ 体可以是四面体、五面体、六面体，或其他任意多面体。对于六面以上的多面体，必须用 ACCAT 命令将某些面联成一个面，以使得对于网格划分而言，仍然是四面体、五面体或六面体。
- ◆ 体上对应线和面的网格划分数可以不同，但有一些限制条件。

对于三维复杂几何模型而言，通常的做法是利用 ANSYS 的布尔运算功能，将其切割成一系列四面体、五面体或六面体，然后对这些切割好的体进行映射网格划分。当然，这种纯粹的映射划分方式比较烦琐，需要的时间和精力较多。面的三角形映射网格划分往往可以为体的自由网格划分服务，以使体的自由网格划分满足一些特定的要求，比如：体的某个狭长面的短边方向上要求一定要有一定层数的单元、某些位置的节点必须在一条直线上等。这种在进行体网格划分前在其面上先划分网格的方式，可以对很多复杂模型进行良好的控制，但别忘了在体网格划分完毕后清除面网格（也可用专门用于辅助网格划分的虚拟单元类型（MESH200）来划分面网格，之后不用清除）。

映射面网格只包含四边形和三角形单元，映射体网格只包含六面体单元。映射网格具有规则的形状，明显成排地规则排列。因此，如果想要这样的网格类型，必须将模型生成具有一系列相当规则的体或面，才能进行映射网格划分。下面以一个简单的五边形为例，介绍映射网格划分的操作。

step 1 建立几何模型。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Pentagon 命令，弹出五边形对话框，输入参数，如图 2.54 所示，单击 OK 按钮，生成的几何模型如图 2.55 所示。

step 2 选择单元类型。选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，如图 2.56 所示。单击 Add... 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Solid 中的 Quad 4node 42 单元，如图 2.57 所示，单击 OK 按钮关闭对话框。

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Meshtool 命令，打开 MeshTool 对话框。选择

Areas 网格划分模式，在 Mesh 下拉列表框中也选择 Areas 选项，表示对面进行划分；在 Shape 栏中选 Quad 单选按钮，表示选择四边形单元形状；接着选择网格划分模式为 Mapped，使用映射网格划分，如图 2.58 所示，然后单击 Mesh 按钮，弹出图形对话框。

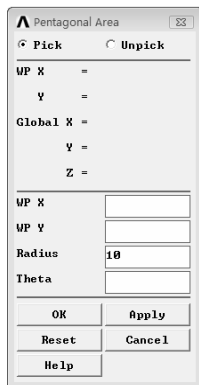


图 2.54 五边形对话框

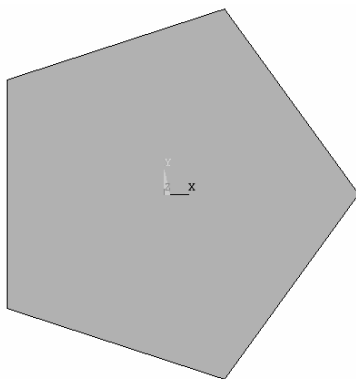


图 2.55 五边形几何模型



图 2.56 Element Types 对话框

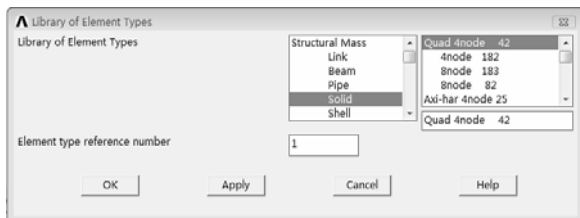


图 2.57 Library of Element Types 对话框

step 4

在图形视窗中选择刚才建立的五边形面，单击 OK 按钮。此时，弹出错误提示对话框，如图 2.59 所示。由于当前图形是不规则的，不能够进行映射网格划分。造成这个错误的原因是该面的边界线数目超过了 4。



对面进行映射网格划分时，要求边的边界由 3 或 4 条线组成，当边界线数据大于 4 时，可通过线的连接使其满足映射网格划分的要求。下面进行线的连接操作，使五边形面满足映射网格划分的要求。

step 5

选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Concatenate→Lines 命令，弹出如图 2.60 所示的线选取对话框，用鼠标在图形视窗中选择相邻两条线合成一条线，如图 2.61 所示。

step 6

此时再在 MeshTool 对话框中选中 Mapped 单选按钮，并在该按钮下的下拉列表框中选中 3 or 4 sided 选项，然后单击 Mesh 按钮，如图 2.62 所示。

step 7

弹出面选取对话框，在图形视窗中选择五边形面，单击 OK 按钮即可。得到的映射网格划分结果如图 2.63 所示。

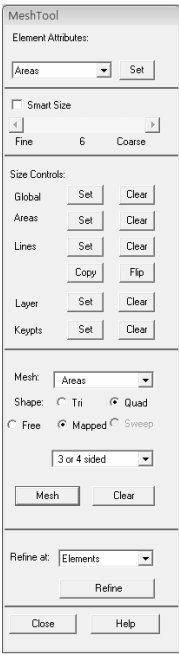


图 2.58 网格划分工具对话框

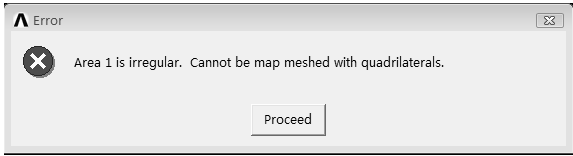


图 2.59 对五边形面进行映射网格划分的错误提示

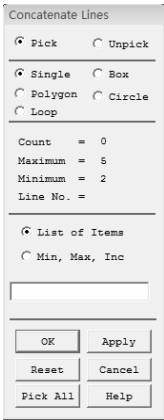


图 2.60 线选取对话框

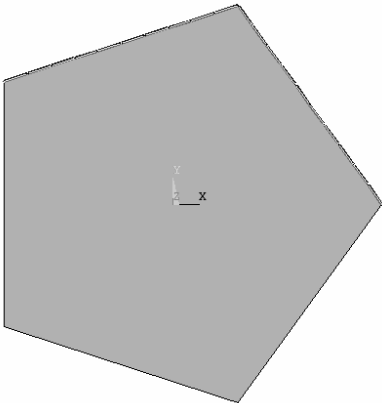


图 2.61 选择相邻两条线合成

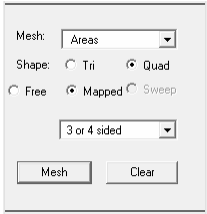


图 2.62 选择映射网格划分

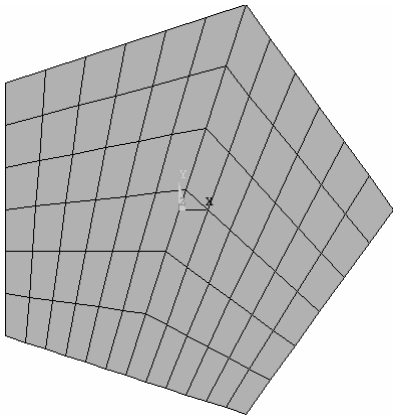


图 2.63 五边形面映射网格划分结果

2.8 小结

几何建模与网格划分是 ANSYS 程序应用的重要组成部分，是有限元分析成功与否的关键，涉及的问题及技巧很多。本章较为系统地讲解了用 ANSYS 程序进行几何建模和网格划分的基本过程和基本方法，重点介绍了网格划分工具 MeshTool 的应用。学完本章讲解的知识，希望读者多做练习，熟练掌握各种复杂几何模型的建模及网格划分的技能。



第 3 章 施加载荷与求解过程

本章包括

- ◆ 载荷与载荷步
- ◆ 载荷步选项与多步载荷的创建
- ◆ 载荷的施加
- ◆ 求解

在建立有限元模型之后,就可以根据结构在工程实际中的应用情况为其制定位移边界条件和载荷,并选择适当的求解器进行求解。在 ANSYS 中,载荷包括边界条件和外部作用力,即位移边界和力边界。ANSYS 能够求解由有限元方法建立的联立方程,求解的结果包括:节点的自由度解,为基本解;原始解的导出解,为单元解。单元解通常是在单元的积分点上计算出来的。

施加载荷和求解过程是 ANSYS 有限元分析中的一个非常重要的组成部分,主要包括确定分析类型和分析选项、施加载荷到几何模型、确定载荷步选项、选择求解的方式和开始求解分析运算等内容。本章首先介绍载荷与载荷步的基本知识,然后介绍载荷的施加,接着介绍载荷步选项与多步载荷的创建,最后介绍 ANSYS 的求解功能。

3.1 载荷与载荷步

在 ANSYS 中,载荷包括所有边界条件以及外部或内部作用效应,可以施加在实体模型(如关键点、线和面)或有限元模型(单元和节点)上。若是在实体模型上施加载荷,ANSYS 求解时会自动将这些载荷转换到相应的节点和单元上。载荷步仅仅是为了获得解答的载荷配置。在线性静态或稳态分析中,可以对不同的载荷步施加不同的载荷组合;在瞬态分析中,多个载荷步会加到载荷历程曲线的不同区段。本节阐述 ANSYS 中载荷和载荷步的相关概念及操作技巧。

3.1.1 载荷的分类

在 ANSYS 中,载荷包括边界条件和外部作用力。实际上,ANSYS 的功能就是分析有限元模型在不同外部作用力以及不同边界条件作用下的响应。

对于不同分析类型,载荷可分为以下几种不同种类。

- ◆ 结构分析中常见的载荷:力、压力、重力、位移边界条件等。
- ◆ 热分析中常见的载荷:温度、热流变率、对流边界条件等。
- ◆ 磁场分析中常见的载荷:磁势、磁通量边界条件等。



读者可以根据要进行分析的内容,来重点掌握某类分析所对应的载荷,对其他分析类型的载荷及其加载方式只作简单了解即可。

为了真实地反映实际物理情况,从物理特性方面,ANSYS 的载荷分为 6 大类:位移(DOF)约束、力(集中载荷)、表面载荷、体积载荷、惯性力和耦合场载荷。

下面分别对这 6 类载荷进行简单说明。

- ◆ **位移约束(DOF Constraint):** 将给定某一自由度的已知值。例如,在结构分析中,约束被指定为位移和对称边界条件;在热力学分析中,被指定为温度和与热通量平行的边界条件。
- ◆ **集中力载荷:** 施加于模型节点的集中载荷。例如在结构的桁架分析中,施加于某个弦节点上的力 F 为 10000N 等。
- ◆ **表面载荷:** 施加于某个面的分布载荷。例如在结构分析中为面压力。
- ◆ **体积载荷:** 体积或场载荷。例如螺管线圈磁场分析中,施加于螺管线圈内部的体电流密度。
- ◆ **惯性载荷:** 由物体惯性引起的载荷。如结构分析中的重力加速度、角速度和角加速度。
- ◆ **耦合场载荷:** 可以认为是以上载荷的一种特殊情况,指将一种分析得到的结果作为另一种分析的载荷。例如,将磁场分析中计算得到的磁力作为结构分析中的力载荷。

3.1.2 载荷步、子步与平衡迭代

确定载荷的种类后,如何在 ANSYS 中描述一个载荷的加载过程?这就需要了解载荷步、子步以及平衡迭代的相关知识。

载荷步是指为了获得解答所施加的载荷所作的相关配置。在线性静态或稳态分析中,可以使用不同的载荷步施加不同的载荷组合。在瞬态分析中,多个载荷步会加到载荷历程曲线的不同区段。

ANSYS 程序将为第一个载荷步选择的单元用于随后的载荷步,而不论用户为随后的载荷步指定哪个单元组。

图 3.1 显示了一个需要 3 个载荷步的载荷历程曲线:第一个载荷步用于线性载荷,第二个载荷步用于不变载荷,第三个载荷步用于卸载。载荷值在载荷步的结束点达到全值(指定的值)。

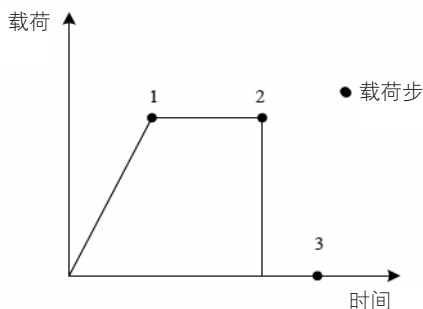


图 3.1 多个载荷步



不同载荷步通常施加同样类型的载荷,只是载荷类型的大小有所不同。但在一些多场耦合分析中,也可以施加不同类型的载荷。

子步(Sub Step)为载荷步中进行求解的点(由程序定义载荷增量)。由于不同的原因,有时需要使用载荷子步。在非线形静态或稳态分析中,使用子步逐渐施加载荷以获得精确解;在线性或非线性瞬态分析中,使用子步是为了满足瞬态时间累积法则(为获得精确解,通常规定一个最小累

积时间步长)；在谐波分析中，使用子步可获得谐波频率范围内多个频率处的解。

平衡迭代是在给定子步下为了收敛而进行的附加计算。在非线性分析中，平衡迭代作为一种迭代修正，具有重要作用，迭代计算多次收敛后得到该载荷子步的解。例如，对二维非线性静态磁场分析，未获得精确解时，通常使用两个载荷步，如图 3.2 所示。第一个载荷步，载荷逐渐加到 5~10 个子步以上，每个子步仅用一个平衡迭代；第二个载荷步，得到最终收敛解，且仅有一个使用 15~25 次平衡迭代的子步。

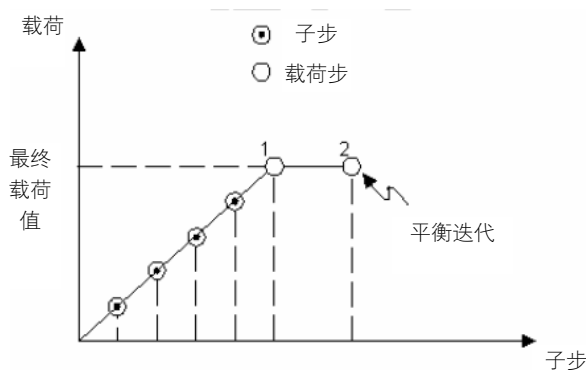


图 3.2 载荷步、子步和平衡迭代

3.1.3 跟踪中时间的作用

在所有静态和瞬态分析中，不论分析是否依赖于时间，ANSYS 使用时间作为跟踪参数。其好处如下。

- ◆ 在所有情况下均可以使用一个不变的“计数器”或“跟踪器”，不需要依赖具体的分析内容。
- ◆ 时间总是单调增加的，且不论该时间是多么短暂，自然界中大多数事情的发生都会经历一段时间。

在瞬态分析与速率相关的静态分析（蠕变或粘塑性）中，时间是指具体的、代表实际的、按年月顺序的时间，用秒表示。在指定载荷历程时，在每个载荷步的结束点赋时间值。然而在不依赖于速率的分析中，时间仅仅作为一个识别载荷步和载荷子步的计数器，而不再表示具体的时间值。

这样计算得到的结果也将是与时间有关的函数，只不过在静力分析中，时间取为常量 0；在瞬态等与速率相关的分析中，时间作为表示真实时间历程的变量在变化；在其他分析中，时间仅仅作为一个计数器，识别求解时所采用的不同载荷步。

从时间的概念上来讲，载荷步就是作用在给定时间间隔内的一系列载荷；子步为载荷步中的时间点，并在这些点上求得中间解。两个连续子步之间的时间差称为时间步长或时间增量。

3.1.4 阶跃载荷与斜坡载荷

虽然前文已经提及，在载荷步的终点的载荷值为指定的值，但当在一个载荷步中指定一个以上的子步时，就出现了载荷应为阶跃载荷（Stepped Load）还是线性斜坡载荷（Ramped Load）的问题，即出现了在一个载荷步的起点与终点之间，载荷的具体施加过程的问题。

如果载荷是阶跃的，那么，全部载荷施加于第一个载荷子步，且在载荷步的其余部分载荷保持不变，如图 3.3（a）所示。

如果载荷是逐渐递增的，那么在每个载荷子步，载荷值逐渐增加，且全部载荷出现在载荷步结束时，如图 3.3（b）所示。

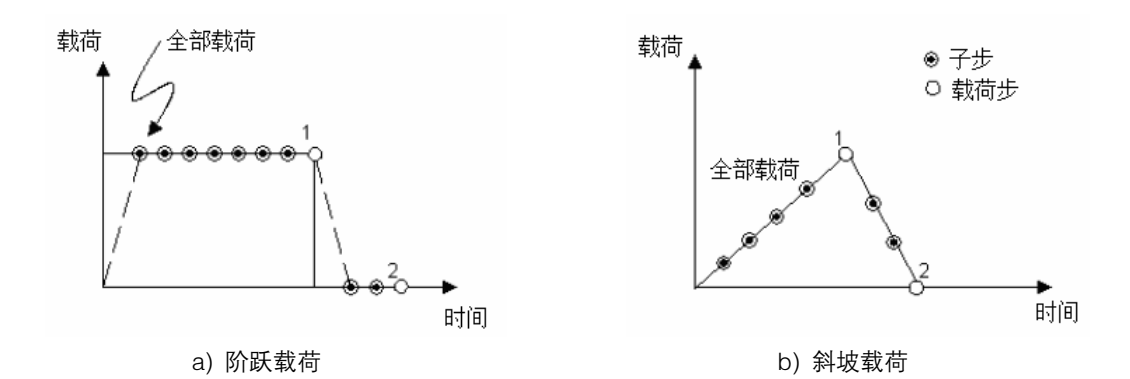


图 3.3 阶跃载荷和斜坡载荷

3.2 载荷的施加

大多数载荷既可以施加于实体模型（关键点、线和面）上，也可以施加于有限元模型（节点和单元）上。但 ANSYS 的求解器期望所有载荷应该依据有限元模型，因此，如果将载荷施加于实体模型，在开始求解时，ANSYS 会自动将这些载荷转换到节点和单元上，当然也可以通过命令转换。

3.2.1 位移约束

位移约束又称 DOF 约束，是对模型在空间中的自由度进行约束。位移约束可施加于节点、关键点、线和面上，用来限制对象某一方向上的自由度。不同学科中可被约束的相应自由度不同，如表 3.1 所示。

表 3.1 不同学科中可用的位移约束

学科	自由度	ANSYS 标识符
结构分析	平动	UX, UY, UZ
	转动	ROTX, ROTY, ROTZ
热分析	温度	TEMP
磁场分析	矢量势	AX, AY, AZ
	标量势	MAG
电场分析	电势	VOLT



各个自由度约束的方向是基于节点坐标系而定的。

从载荷的加载方式可知，自由度约束可以直接加载到有限元载荷的节点上，也可以施加到实体

模型中的关键点、线和面上。

3.2.1.1 位移约束的施加

下面以结构分析中的位移约束施加为例，讲解如何施加位移约束。

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement 命令，展开结构分析中的位移加载子菜单，如图 3.4 所示。

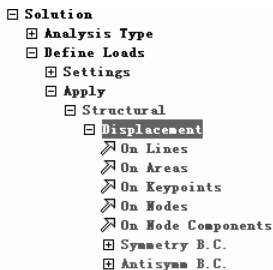


图 3.4 结构分析中的位移加载子菜单

该子菜单中的各菜单项如下。

- ◆ On Lines: 在线上施加约束。
- ◆ On Areas: 在面上施加约束。
- ◆ On Keypoints: 在关键点上施加约束。
- ◆ On Nodes: 在节点上施加约束。
- ◆ On Node Components: 在节点组件上施加约束。
- ◆ Symmetry B.C.和 Antisymm B.C.: 对称边界条件和反对称边界条件。



B.C.为 Boudary Condition (边界条件) 的缩写。


下面以矩形厚板为例，介绍位移约束的常用操作。

step 1 启动 ANSYS，选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By 2 Corners & Z 命令，在弹出的对话框中输入 Width 为 20，Height 为 20，Depth 为 5，单击 OK 按钮得到如图 3.5 所示的实体模型。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，按第 2 章所介绍的方法定义单元类型为 SOLID65。

step 3 单击工具栏上的 SAVE_DB 按钮保存当前模型，本章后面的内容还要用到此模型。



本步骤为保存操作，也可单击工具栏上的  按钮保存当前模型。

step 4 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints 命令，弹出如图 3.6 所示的图形拾取对话框。在文本框中输入 5 或者用鼠标在图形视窗中选择关键点 5，然后单击 OK 按钮，如图 3.6 所示。

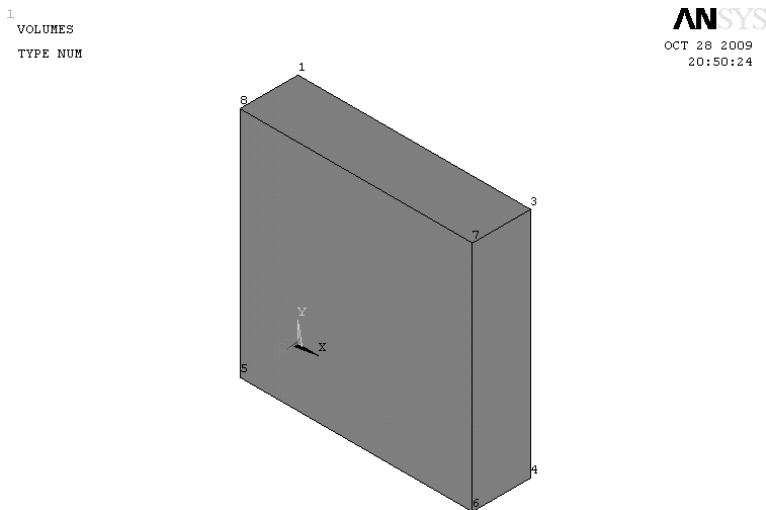


图 3.5 实体模型



在没有进行单元类型定义之前，位移约束的施加菜单为不可见状态。因此，建议读者在进行有限元分析时先定义单元类型及实常数等属性。

step 5

接着弹出如图 3.7 所示的 Apply U,ROT on KPs 对话框。在 DOFs to be constrained 列表框中选择 ALL DOF 选项，其他设置保持不变，然后单击 OK 按钮，即对关键点 5 约束了各方向的自由度。

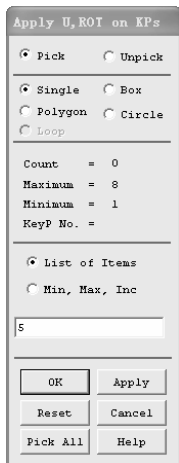


图 3.6 选择待施加约束的关键点

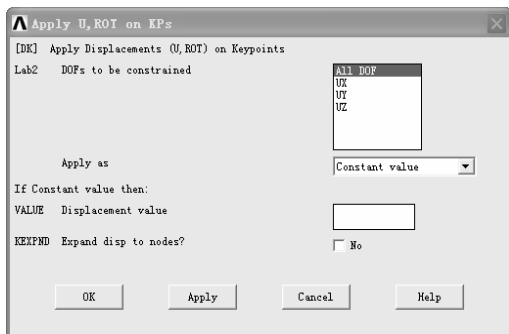


图 3.7 约束所有自由度



在图 3.7 所示的对话框的 Displacement value 文本框中需输入位移约束值，默认值为 0，因此用户置空即表示位移约束值为 0。还可以将其设置为其值，正值表示沿笛卡尔坐标正向，负值表示沿笛卡尔坐标负向。

step 6

重复以上两步操作，按图 3.8 所示进行设置，为关键点 6 约束 UY 和 UZ 方向的自由度。

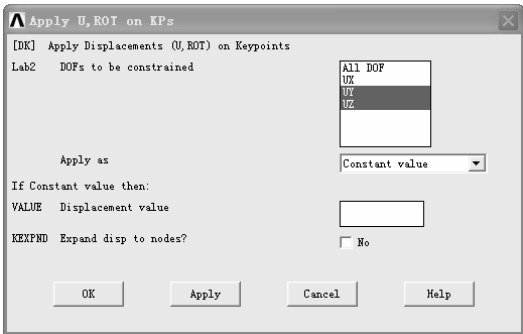


图 3.8 约束 UY 和 UZ



在图 3.8 所示的对话框中，DOFs to be constrained 列表框为多选列表框，可同时选中多个自由度，选中的选项会自动变为深色，如图 3.8 所示。

step 7 施加完约束的模型如图 3.9 所示。

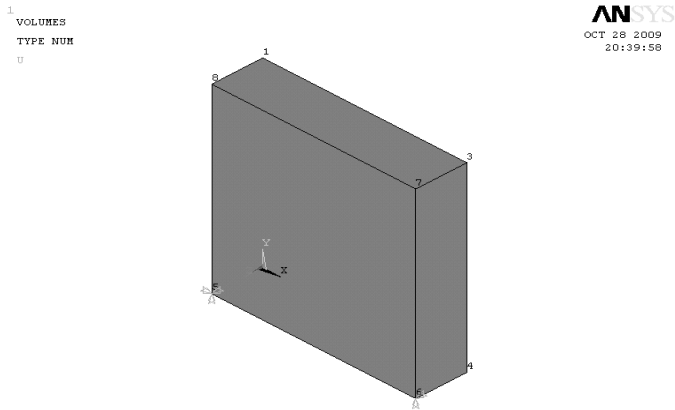


图 3.9 施加完约束的模型

step 8 可以选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Delete→Structural→Displacement→On Keypoints 命令来删除关键点上施加的位移约束。当弹出图形拾取对话框后，选中要删除约束的关键点，单击 OK 按钮，弹出 Delete KP Constraints 对话框，在 DOFs to be deleted 下拉列表框中选中要删除的约束方向，再单击 OK 按钮即可。



删除位移约束后，图形视窗中通常仍显示该约束的符号，此时用户从右键菜单中选择 Replot 选项刷新屏幕即可。

对节点、线、面均可施加相应的位移约束，其操作与对关键点施加位移约束类似，不再详述。

3.2.1.2 对称和反对称约束

在有限元分析中，经常使用对称或反对称条件来简化模型。对于结构分析而言，对称边界条件指平面外移动和平面内旋转被设置为 0，而反对称边界条件指平面内移动和平面外旋转被设置为 0，如图 3.10 所示。



图 3.10 对称与反对称约束

下面以上一节中建立的矩形厚板模型为例，介绍施加对称约束的操作方法。

- step 1** 设置工作目录为刚才创建模型的目录，启动 ANSYS，单击工具栏上的 RESUM_DB 按钮，恢复保存的模型数据库。
- step 2** 选择 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → Symmetry B.C. → On Areas 命令，弹出 Apply SYMM on Areas 对话框，在图形视窗中选左侧端面。
- step 3** 单击 OK 按钮，对称约束即施加完毕，如图 3.11 所示，对称边界上标有 S 标记。

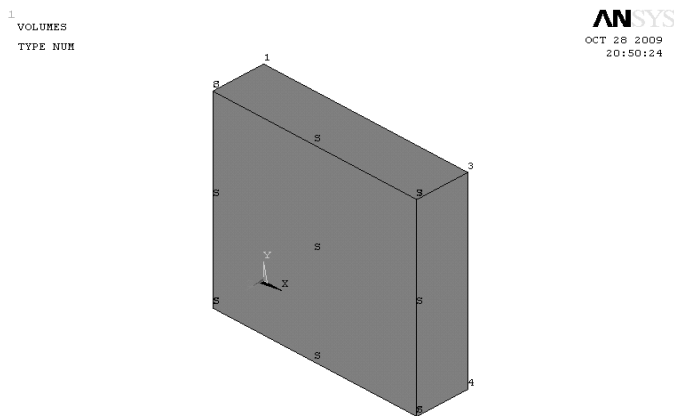


图 3.11 对面施加对称约束



用户可选择 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → Antisymm B.C. → On Areas 命令对面施加反对称约束。施加过反对称约束的边界上将标有 A 标记。

对节点、线施加相应对称或反对称约束的操作与之类似，在此不再详述。

3.2.1.3 耦合自由度

耦合是指几个节点的自由度取相同的值，耦合自由度中包含一个主自由度和一个或几个从自由度。通过耦合，可以在两个重复节点间形成铰链、销钉或滑动连接等特殊的节点自由度关系。当用

户需要使两个或更多的自由度取相同的值时，可以使用耦合自由度的方法。



由于只能对节点的自由度进行耦合，因此在进行自由度耦合之前应先划分网格。

下面以前面的矩形厚板为例，对其端面的节点自由度进行耦合操作，具体步骤如下。

- step 1** 单击工具栏上的 RESUM_DB 按钮，恢复 3.2.1.1 节中保存的模型数据库。
- step 2** 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→4 to 6 sided 命令，选择图形视窗中的体，单击 OK 按钮，可得到如图 3.12 所示的网格。

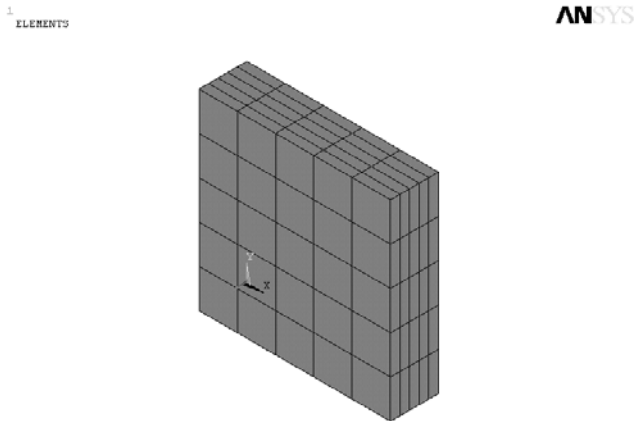


图 3.12 矩形厚板单元图

- step 3** 选择 Utility Menu→Select→Entities 命令，弹出如图 3.13 所示的实体选择对话框。在最上面的下拉列表框中选择 Nodes 选项，在其下面的下拉列表框中选择 By Location 选项，并选中 Z coordinates 单选按钮，然后在 Min, Max 文本框中输入 Z 向的坐标 5，单击 OK 按钮。这样就选中了左端面上的所有节点。
- step 4** 选择 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Couple DOFs 命令，弹出图形拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出如图 3.14 所示的对话框。



图 3.13 按位置选择节点

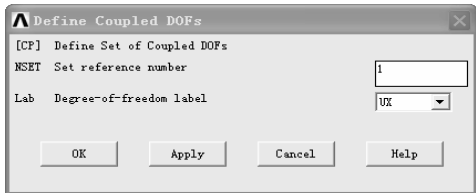


图 3.14 耦合自由度

step 5 在 Set reference number 文本框中输入耦合集的编号 1, 在 Degree-of-freedom label 下拉列表框中选择 UZ 选项, 约束 Z 向的自由度。耦合后的结果如图 3.15 所示。

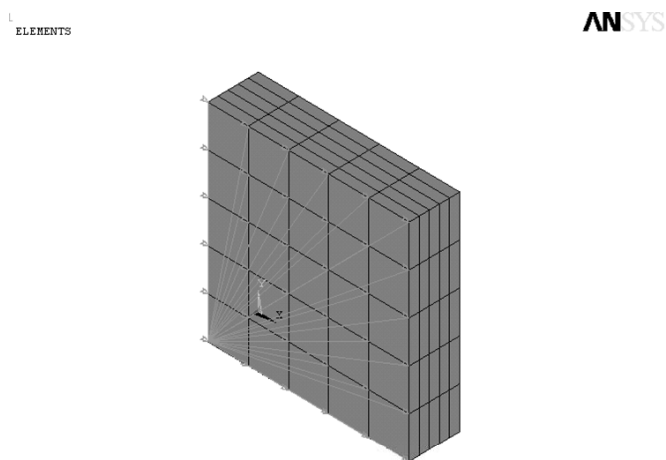


图 3.15 自由度耦合结果



只允许对 UX、UY 和 UZ 3 个方向的自由度进行耦合操作。

如果要删除定义的自由度耦合, 可选择 Main Menu→Preprocessor→Coupling/Ceqn→Del Coupled Sets 命令, 在 Range of sets 的 3 个文本框中分别输入耦合集的起始编号、终止编号和步长, 然后单击 OK 按钮即可。

3.2.1.4 约束方程

约束方程是在节点自由度之间建立联系的通用方法, 通过约束方程可以建立更复杂的节点自由度关系。

选择 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Constraint Eqn 命令, 弹出如图 3.16 所示的约束方程对话框。该对话框中所示的约束方程为: $5 * (UX_1) + 2 * (UY_10) + 3 * (UZ_20) = 0$, 其中 UX_1、UY_10 和 UZ_20 分别表示节点 1 的 UX 位移、节点 10 的 UY 位移和节点 20 的 UZ 位移。



用户可选择 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Del Constr Eqn 命令删除定义的约束方程。

3.2.2 集中载荷

表 3.2 显示了各学科中可用的集中载荷和相应的 ANSYS 标识符。其中, 标识符 (如 FX, MZ, CSGY 等) 所指的任何方向都在节点坐标系中。

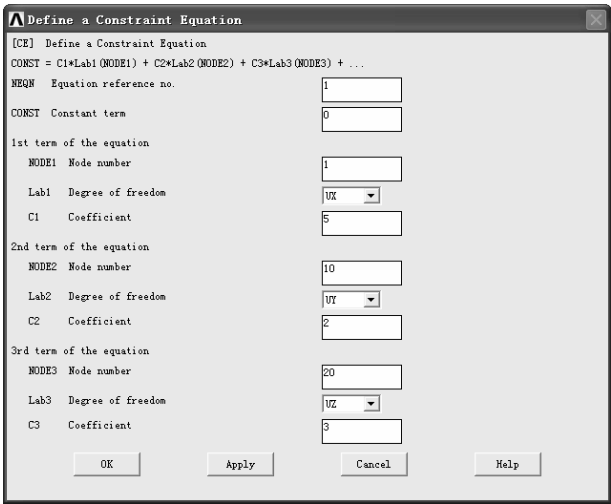


图 3.16 设置约束方程

表 3.2 各学科中可用的“力”

学科	力	ANSYS 标识符
结构分析	力	FX, FY, FZ
	力矩	MX, MY, MZ
热分析	热流速率	HEAT
磁场分析	磁流段	CSGX, CSGY, CSGZ
	磁通量	FLUX
	电荷	CHRG
电场分析	电流	AMPS
	电荷	CHRG



从字面意义上看，集中力是将力集中到某一点上，故集中力载荷只能施加到节点或者关键点上。

我们仍以结构分析为主来讲述施加集中力载荷的方法。

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment 命令，展开集中力载荷施加子菜单，如图 3.17 所示。

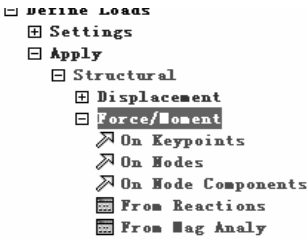


图 3.17 结构分析中的集中力载荷子菜单

各级子菜单的功能如下。

◆ On Keypoints：在关键点上施加集中力。

- ◆ **On Nodes:** 在节点上施加集中力。
- ◆ **On Node Components:** 在节点组件上施加集中力载荷。
- ◆ **From Reactions 和 From Mag Analy:** 用于耦合场分析。

下面以图 3.5 所示的矩形厚板为例, 通过在关键点 7、8 上施加竖向集中力, 介绍集中力加载的基本操作。

- step 1** 单击工具栏上的 RESUM_DB 按钮, 恢复 3.2.1 节中保存的模型数据库。
- step 2** 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Keypoints 命令, 弹出图形拾取对话框, 用鼠标在图形视窗中选关键点 7 和 8, 然后单击 OK 按钮, 弹出如图 3.18 所示的对话框。

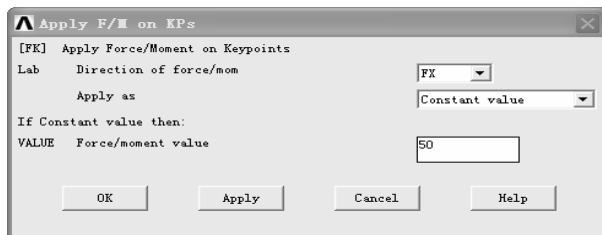


图 3.18 对关键点施加集中力

- step 3** 在 Direction of force /mom 下拉列表框中选择 FY 选项, 在 Force/moment value 文本框中输入力的大小为 50, 然后单击 OK 按钮即可, 结果如图 3.19 所示。

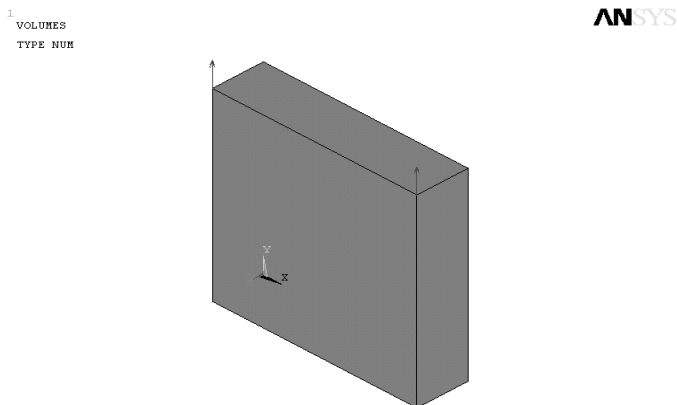


图 3.19 施加 Y 向的集中力



在默认情况下, 若在同一个位置重新设置力或力矩, 则新的设置将取代原来的设置。

下面是对于集中载荷的其他操作。

列表显示节点的集中载荷信息:

GUI: Utility Menu→List→Loads→Forces→On All Nodes

Utility Menu→List→Loads→Forces→On Picked Nodes

列表显示关键点的集中载荷信息:

GUI: Utility Menu→List→Loads→Forces→On All Keypoints
Utility Menu→List→Loads→Forces→On Picked Keypoints
重新设置集中载荷:
GUI: Main Menu→Preprocessor→Loads→Settings→Peplace vs.Add→Forces
Main Menu→Solution→Settings→Peplace vs.Add→Forces
按比例缩放集中载荷:
GUI: Main Menu→Preprocessor→Loads→Oprate→Transfer to FE→Forces
Main Menu→Solution→Oprate→Transfer to FE→Forces

3.2.3 表面载荷

表面载荷是结构分析中常见的一种载荷形式。在 ANSYS 中，不仅可以将表面载荷施加到线和面上，还可以将其施加到节点和单元上；可以施加均布的载荷，也可以施加线性变化的载荷，还可以施加按一定函数关系变化的载荷。各学科中可施加的表面载荷如表 3.3 所示。

表 3.3 各学科中可施加的表面载荷

学科	表面载荷	ANSYS 标识符
结构分析	压力	PRES
热分析	对流	CONV
	热流量	HFLUX
	无限表面	INF
磁场分析	麦克斯韦表面	MXWF
	无限表面	INF
电场分析	麦克斯韦表面	MXWF
	表面电荷密度	CHRGs
	无限表面	INF



表面载荷不像集中力载荷和 DOF 约束那样直观，虽然也可以直接施加到节点上，但其本质上属于一种分布载荷。

3.2.3.1 表面载荷的施加

我们仍然以结构分析为例，讲述如何施加表面载荷。

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure 命令，展开面载荷施加菜单，如图 3.20 所示。



图 3.20 结构分析中的面载荷施加菜单

其下的各级子菜单如下。

- ◆ On Lines: 在线上施加压力面载荷。
- ◆ On Areas: 在面上施加压力面载荷。
- ◆ On Nodes: 在节点上施加压力面载荷。
- ◆ On Node Components: 在节点组件上施加面载荷。
- ◆ On Elements: 在单元上施加压力面载荷。
- ◆ On Element Components: 在单元组件上施加压力面载荷。
- ◆ On Beams: 在梁上施加压力面载荷。
- ◆ From Fluid Analy: 用于耦合场分析。



ANSYS 程序是根据单元和单元面来存储节点上的面载荷。因此, 如果对同一表面使用节点面载荷命令和单元面载荷命令, 则最后施加的面载荷命令有效。

梁单元是一种线单元, 可以在其上施加侧向的压力载荷, 其大小为每单位长度的力, 压力可以沿长度线性变化。

下面以简支梁为例, 介绍在梁单元上施加压力的相关操作。建立简支梁模型并划分单元, 得到的简支梁单元模型如图 3.21 所示。

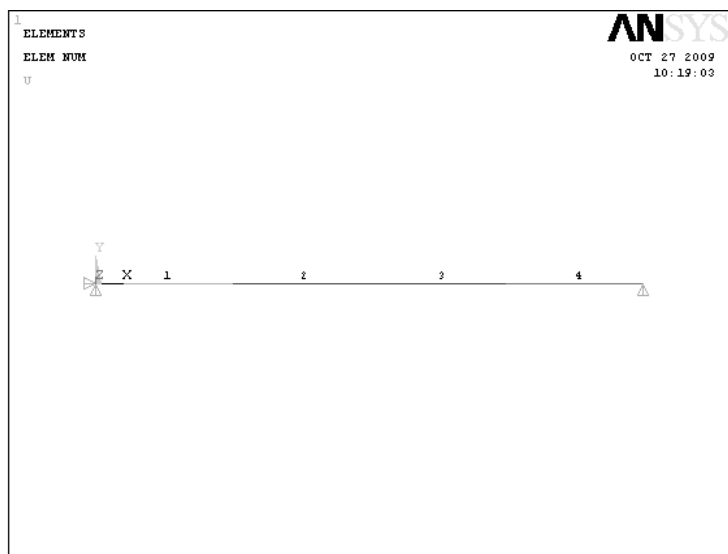


图 3.21 简支梁单元模型图

step 1 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Beams 命令, 弹出图形拾取对话框, 选择单元 1, 单击 Apply 按钮, 弹出如图 3.22 所示的 Apply PRES on Beams 对话框。

step 2 在该对话框中设置各选项: 在 Load Key 文本框中输入 1, 在 Pressure value at node I 文本框中输入 10, 单击 Apply 按钮, 结果如图 3.23 所示, 压力载荷为均布载荷。

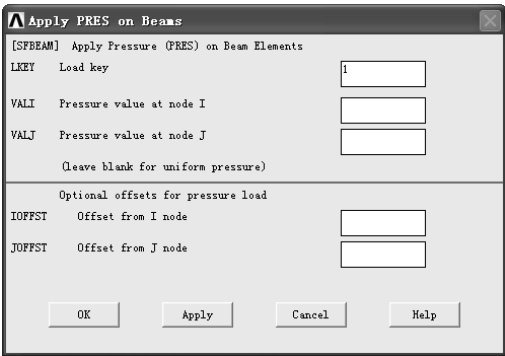


图 3.22 对梁单元施加面载荷

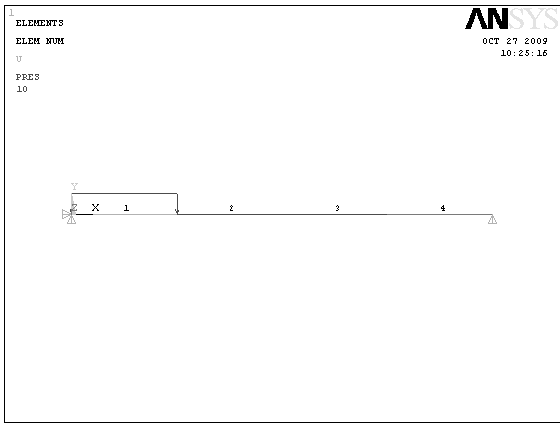


图 3.23 施加均布载荷

step 3 选取单元 2, 在 Apply PRES on Beams 对话框中, 在 Load key 文本框中输入 1, 在 Pressure value at node I 文本框中输入 10, 在 Pressure value at node J 文本框中输入 0。结果如图 3.24 所示, 压力载荷为三角形载荷。

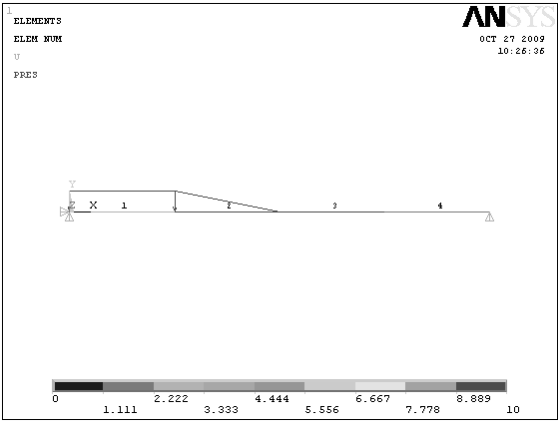


图 3.24 施加三角形载荷

step 4 选取单元 3, 在 Apply PRES on Beams 对话框中, 设置 Load key 为 1, Pressure value at node I 为 10, Offset from I node (压力载荷起点与节点 I 的偏移距离) 为 0.2。结果如图



3.25 所示，载荷与梁单元节点有偏移。

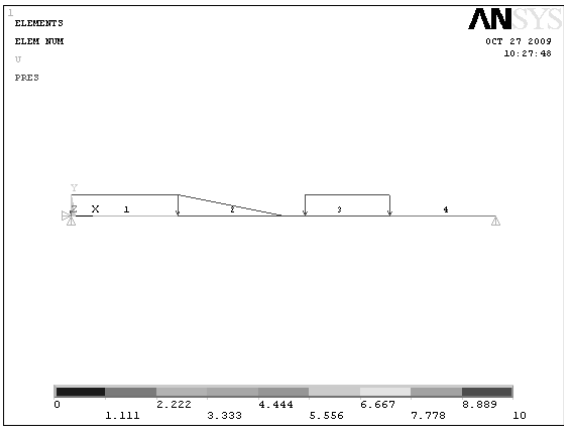


图 3.25 施加节点/偏移载荷

Load key 用于设置压力载荷的类型，设为 1 表示从节点 I 到节点 J 的法向力，正值表示沿单元坐标系-Y 法向；设为 2 表示节点 I 到 J 的切向力，正值表示沿单元坐标系+Z 切向；设为 3 表示节点 I 端部轴向力，正值表示沿单元坐标系+X 轴向；设为 4 表示节点 J 端部轴向力，正值表示沿单元坐标系-X 轴向。

对于梁单元以外的其他单元类型，可以在线、面、节点或单元上施加均布压力，其方法与施加梁压力载荷类似，此处不再详述。

3.2.3.2 指定斜率面载荷

可以选择主菜单命令来设置线性变化的压力。接下来将用 PLANE182 单元建立一个方形板，然后在一边上施加线性变化的压力，具体操作步骤如下。

step 1 选择单元类型为 PLANE182，建立正方形板，边长为 1，将每边划分为 4 段，进行网格划分，如图 3.26 所示。

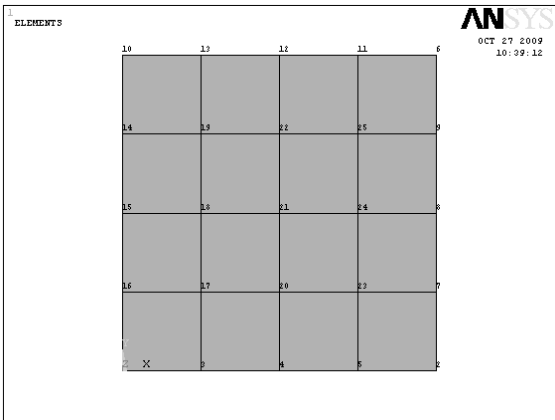


图 3.26 正方形板

step 2 选择 Main Menu→Solution→Settings→For Surface Ld→Gradient 命令，弹出的对话框如

图 3.27 所示。在 Type of surface load 下拉列表框中选择 Pressure 选项, 在 Slope value 文本框中输入 10, 在 Slope direction 下拉列表框中选择 X direction 选项, 在 Location along Sldir 文本框中输入 0, 在 Slope coordinate system 文本框中输入 0, 然后单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

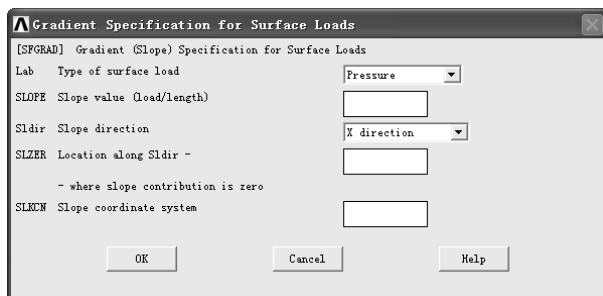


图 3.27 Gradient Specification for Surface Loads 对话框

step 3 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Nodes 命令, 弹出 Apply PRES on Nodes 对话框, 选择正方形板上边的 10、13、12、11、6 这 5 个节点, 单击 OK 按钮, 弹出 Apply PRES on nodes 对话框, 如图 3.28 所示。

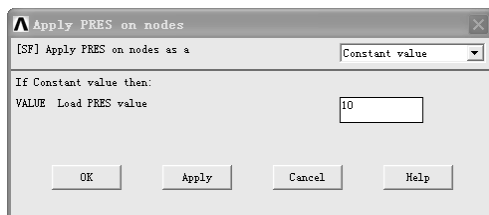


图 3.28 Apply PRES on nodes 对话框

step 4 在 Load PRES value 文本框中输入 10, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 5 选择 PlotCtrls→Symbols 命令, 弹出 Symbols 对话框。在该对话框的 Surface Load symbols 下拉列表框中选择 Pressure 选项, 并在 Show pres and convect as 下拉列表框中选择 Arrow 选项, 然后单击 OK 按钮关闭对话框。显示结果如图 3.29 所示。

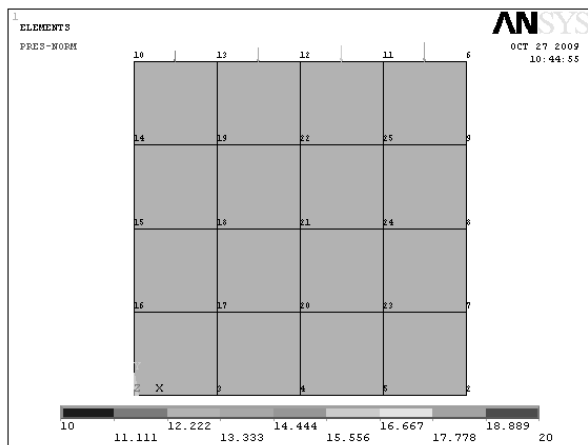


图 3.29 线性变化的压力

step 6 选择 List→Loads→On picked Nodes 命令，选择 10、13、12、11、6 这 5 个节点，列出其压力载荷，如图 3.30 所示。

LIST NODAL SURFACE LOAD PRES FOR ALL PICKED NODES

ELEMENT	LKEY	FACE	NODES	REAL	IMAGINARY
13	3		10	10.0000000	0.00000000
			13	12.5000000	0.00000000
14	3		13	12.5000000	0.00000000
			12	15.0000000	0.00000000
15	3		12	15.0000000	0.00000000
			11	17.5000000	0.00000000
16	3		11	17.5000000	0.00000000
			6	20.0000000	0.00000000

图 3.30 列表显示压力加载结果



设置斜率之后，所施加的沿斜率变化方向的压力载荷都将按该斜率线性变化。要恢复压力载荷为均匀分布，在输入命令窗口输入“SGRAD”后按 Enter 键即可。

对于按一定的函数关系非线性变化的压力载荷，可以运用函数加载的方法进行施加。这里不作详细介绍。

3.2.4 体载荷

体载荷是作用于模型体积上的载荷，许多实体模型都支持体载荷的施加，这也是十分常用的一种载荷形式，需要认真了解。各学科中可施加的体载荷如表 3.4 所示。

表 3.4 各学科中可施加的体载荷

学科	体载荷	ANSYS 标识符
结构分析	温度	TEMP
	惯性载荷	Gravity
热分析	热生成速率	HGEN
磁场分析	温度	TEMP
	电流密度	JS
	电压降	VLTG
电场分析	温度	TEMP
	体电荷密度	CHRGD

3.2.4.1 温度载荷的施加

下面仍然以结构分析中的施加温度体载荷为例，讲述如何施加体载荷。

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Temperature 命令，展开结构分析中的施加温度体载荷子菜单，如图 3.31 所示。

其各级子菜单的功能如下。

- ◆ On Lines: 在线上施加温度体载荷。
- ◆ On Areas: 在面上施加温度体载荷。

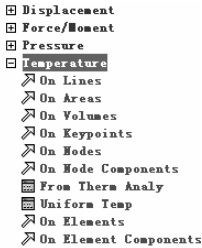


图 3.31 结构分析中施加温度体载荷菜单

- ◆ On Volumes: 在体上施加温度体载荷。
- ◆ On Nodes: 在节点上施加温度体载荷。
- ◆ On Node Components: 在节点组件上施加温度体载荷。
- ◆ On Elements: 在单元上施加温度体载荷。
- ◆ On Element Components: 在单元组件上施加温度体载荷。
- ◆ From Therm Analys: 用于耦合场分析。
- ◆ Uniform Temp: 可以施加均匀分布的温度。



节点指定的体积载荷独立于单元上的载荷。对于一个给定的单元，ANSYS 程序按下列方法决定使用哪一种载荷。

- ◆ ANSYS 程序检查用户是否对单元指定了体积载荷。
- ◆ 如果不是，则使用指定给节点的体积载荷。

下面依旧用 3.2.1 节所保存的例子简单示范温度体载荷的加载过程。

- step 1** 单击工具栏上的 RESUM_DB 按钮，恢复 3.2.1 节中保存的模型数据库。
- step 2** 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Nodes 命令，弹出图形拾取对话框，选择适当的节点，单击 OK 按钮，弹出如图 3.32 所示的对话框。

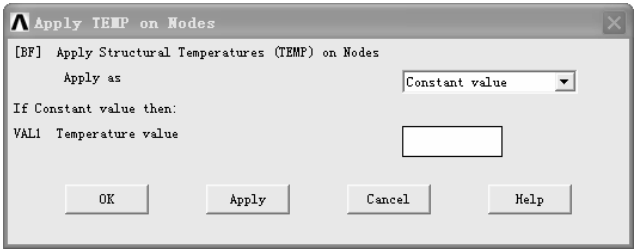


图 3.32 施加温度体载荷

- step 3** 在 Temperature value 文本框中输入温度值，再单击 OK 按钮即可。
- step 4** 选择 Utility Menu→List→Loads→Body→On All Nodes 命令，可列表显示节点的体载荷。

可以对单元、关键点、线、面和体施加体载荷，操作与此类似，在此不再详述。有关体载荷的施加位置，可参考 ANSYS 自带的帮助文档。



3.2.4.2 惯性载荷的施加

惯性载荷中最常见的是重力载荷。下面简单介绍重力载荷的施加步骤。

step 1 单击工具栏上的 RESUM_DB 按钮，恢复 3.2.1 节中保存的模型数据库。

step 2 建立好有限元模型后，选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Inertia→Gravity→Global 命令，弹出如图 3.33 所示的 Apply (Gravitational) Acceleration 对话框。

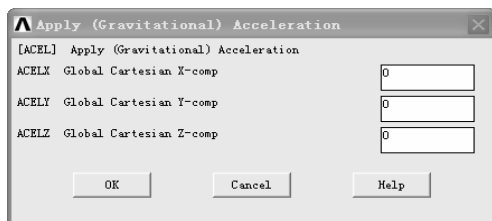


图 3.33 施加重力载荷

step 3 在 Global Cartesian Y-comp 文本框中输入重力加速度 9.8，然后单击 OK 按钮即可。此时图形视窗中会有一个向上的箭头表示加速度场的方向。



此命令用于对物体施加一个加速度场（非重力场），因此，要施加作用于负 Y 方向的重力，应指定一个正 Y 方向的加速度。输入加速度值时应注意单位的一致性。

step 4 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Delete→Structural→Inertia→Gravity 命令，在弹出的对话框中单击 OK 按钮，将删除定义的惯性载荷。

3.3 载荷步选项与多步载荷的创建

载荷步选项是各选项的总称，这些选项包括控制载荷如何在求解过程中使用的选项以及其他选项，如输出控制、阻尼特性设置和响应频谱数据等。载荷步是根据载荷时间历程曲线划分段数，每一个载荷步代表载荷发生一次突变或渐变的过程。多步载荷有两种创建方式，即替换式和叠加式。本节将着重阐述载荷步选项与多步载荷创建的内容。

3.3.1 载荷步选项

载荷步选项（Load Step Options）是用于表示控制载荷应用的选项（如时间、子步数、时间步及载荷阶跃或逐渐递增等）的总称，包括普通选项和非线性选项，这里主要讲解普通载荷步选项。

选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time&Time Step 命令，弹出时间和时间步选项对话框，如图 3.34 所示。



如果 Load Step Opts 子菜单中没有 Time/Frequency 选项，则需要完整的菜单选项。调出完整的菜单选项的方法为 GUI:Main Menu→Solution→Unabridged Menu。

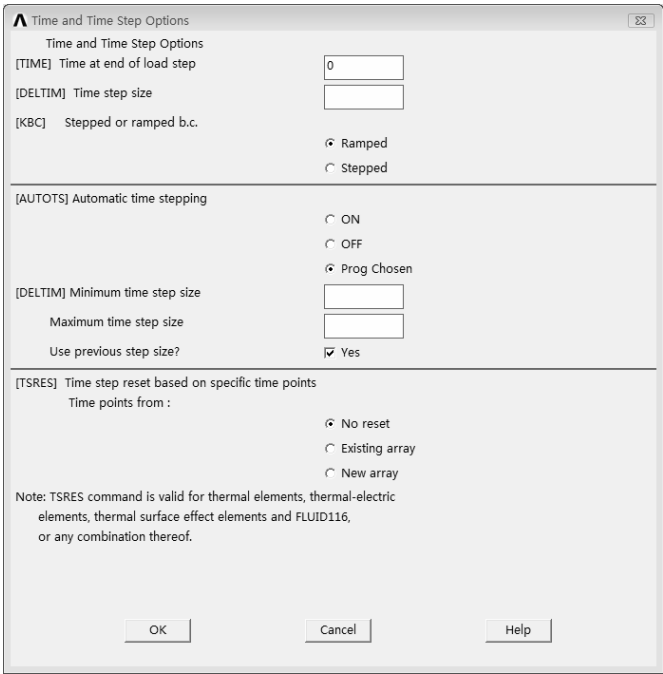


图 3.34 时间和时间步选项

还可以通过其他方式来设置这些通用选项。

GUI: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time & Substeps，选择该菜单命令后出现如图 3.35 所示的 Time and Substep Options（时间和子步选项）对话框。

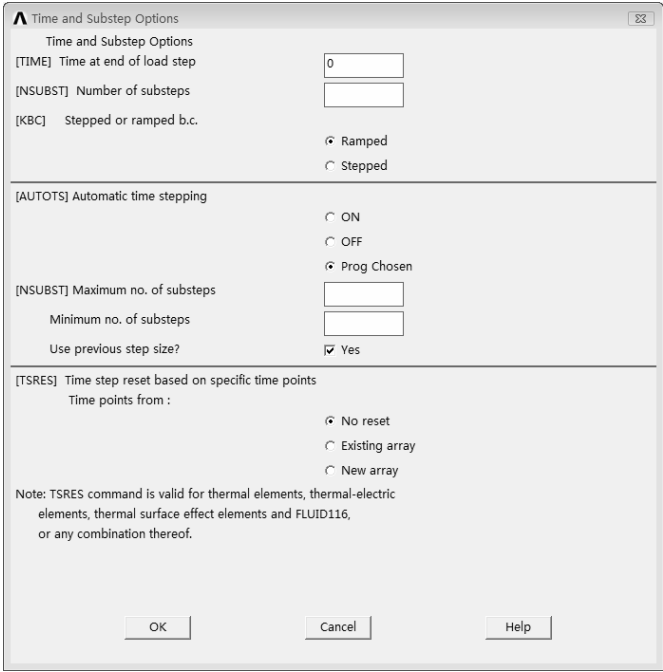


图 3.35 时间选项与子步选项

该对话框中提供了静力分析中用到的普通载荷步选项，介绍如下。

1. TIME (时间)

该选项指定载荷步的终止时间。第一个载荷步的默认值是 1.0,以后每一个载荷步默认递增 1.0。尽管时间对静力分析没有物理意义 (除了蠕变、粘塑性或其他依材料性质而定的行为), 但涉及到载荷步和载荷子步时, 它是很方便的工具。该选项值不能为零, 如果载荷步终止时间确实为零 (比如施加初始条件等特殊情况), 可以将其指定为一个非常小的值, 比如 $1e-6$ 。

GUI:

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time & Time Step

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time & Substeps

2. NSUBST (子步数) 和 DELTIM (时间步大小)

对于瞬态分析, 需要指定一个载荷步中需要的子步数。子步数可以通过不同的方法确定。

可通过指定载荷子步的时间步大小让 ANSYS 自动计算操作数步数。

GUI: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time & Time Step

该项可以给出载荷子步的时间步大小, 然后 ANSYS 程序根据整个载荷步的长度计算出子步数。载荷子步的时间步大小由图 3.5 中 Time step size (时间步大小) 文本框中的输入值决定。

也可通过直接指定载荷子步数确定子步数。

GUI: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time & Substeps

默认情况下, ANSYS 程序在每个载荷步中使用一个子步, 此子步的时间长度与载荷步的时间长度相同。载荷子步数由图 3.34 中 Number of substeps (载荷子步数) 文本框中的输入值决定。

3. KBC (斜坡或阶跃选项)

该选项用来确定本载荷步所加的载荷值是阶跃加载 (KBC,1), 还是斜坡加载 (KBC,0)。如果是阶跃加载, 则全部载荷值加在了第一个载荷子步上, 后续载荷子步的载荷值和第一个子步结束时的载荷值保持相同。默认是斜坡加载, 即每个子步的载荷值顺次线性增加。该选项对应图 3.33 和图 3.34 中的 Stepped or ramped b.c. (斜坡或阶跃载荷) 栏, 当选中 Stepped 单选按钮时, 对应于 “KBC, 1”, 载荷阶跃施加; 选中 Ramped 单选按钮时, 对应于 “KBC, 0”, 载荷斜坡施加。

GUI: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time & Time Step

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time & Substeps

4. AUTOTS (自动时间步)

该选项对应图 3.33 和图 3.34 中的 Automatic time stepping (自动时间步) 栏, 激活该选项时, ANSYS 自动计算每个子步结束时的最优时间步。默认选中 Prog Chosen (程序选择) 单选按钮。

GUI: Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time & Time Step/Time & Substeps

该选项的作用也是确定载荷子步的个数。可以指定最大和最小载荷子步数或者最长和最短时间步数, 对该选项进行控制。

3.3.2 创建多载荷步

所有载荷和载荷步选项一起构成一个载荷步, 可以通过 ANSYS 程序来计算该载荷步的解。如果有多个载荷步, 可将每个载荷步存入一个文件中, 开始求解时, 调入该载荷步文件, 并从文件中读取载荷步数据并求解。

可使用下列方法写载荷步文件：

选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Write LS File 命令，所有载荷步都写入后，可以使用命令在文件中顺序读取数据，并求得每个载荷步的解。

下面给出创建多载荷步的过程。

step 1 选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequency→Time&Time Step 命令，弹出如图 3.34 所示的对话框，在 Time at end of load step（载荷步结束时间）文本框中输入载荷步的结束时间，并在该对话框中设置子步的相关选项，如时间步大小等，指定载荷施加形式是阶跃载荷还是斜坡载荷，设置完成后单击 OK 按钮。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Write LS File 命令，弹出如图 3.36 所示的 Write Load Step File（写载荷步文件）对话框，在 Load step file number n 文本框中填入当前定义的载荷步的顺序编号，单击 OK 按钮后，ANSYS 会在当前工作目录下创建文件名为 Jobname.S0n（n 为指定值）的载荷步文件。

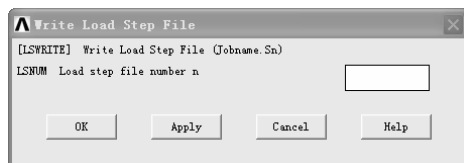


图 3.36 写入载荷步文件

step 3 重复前两个步骤，创建多个载荷步文件。



在载荷步文件创建后，如果需要修改某一个载荷步选项或载荷，可以将此载荷步文件读入，修改之后再重新写入。注意，写入时指定的载荷步文件的顺序编号一定要与读入的载荷步文件顺序编号相同。否则，其他载荷步文件将会被覆盖。

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Read LS File 命令，弹出如图 3.37 所示的 Read Load Step File（读载荷步文件）对话框，在 Load step file number n 文本框中填入欲读取的载荷步文件的顺序编号，单击 OK 按钮，即可读入指定的载荷步文件。

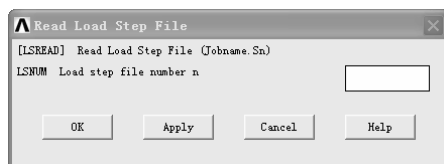


图 3.37 读取指定载荷步文件

3.4 求解

通俗地讲，ANSYS 的求解就是解方程。ANSYS 通过各类求解器，求解由有限元方法建立的联立方程组，其结果是得到节点的自由度解，并进一步得到单元解。单元解通常是在单元的积分点上计算出来的，ANSYS 程序将结果写入数据库和结果文件（Jobname.RST，RTH，RMG，RFL）。

3.4.1 求解器选择

表 3.5 提供了求解器选择的一般准则，帮助读者针对给定的问题选择合适的求解器。

表 3.5 求解器选择准则

解法	典型应用场合	模型尺寸	内存使用	硬盘使用
正向直接解法（直接消除法）	要求稳定性（非线性分析）或内存受限制时	低于 50000 自由度	低	高
稀疏矩阵直接解法	要求稳定性和求解速度（非线性分析）；线性分析时迭代法收敛很慢时（尤其对病态矩阵，如形状不好的单元）	自由度为 10000~500000（多用于板壳和梁模型）	中	高
雅可比共轭梯度法	在单场问题（如热、磁、声、多物理问题）中求解速度很重要时	自由度为 50000~1000000	中	低
不完全乔类斯基共轭梯度法	在多物理模型应用中求解速度很重要时，处理其他迭代法很难收敛的模型（几乎是无穷矩阵）	自由度为 50000~1000000	高	低
预条件共轭梯度法	当求解速度很重要时（大型模型的线性分析），尤其适合实体单元的大型模型	自由度为 50000~1000000	高	低
代数多栅求解器	与预条件共轭梯度法相同，此外，可以在共享存储器的并行机上升级到 8 处理器	自由度为 50000~1000000	高	低

进行求解时，程序默认的求解器是直接解法，用户若改变求解器，可按下述步骤操作。

step 1 选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 命令，弹出求解控制对话框，选择其中的 Sol'n Options 选项卡，如图 3.38 所示。

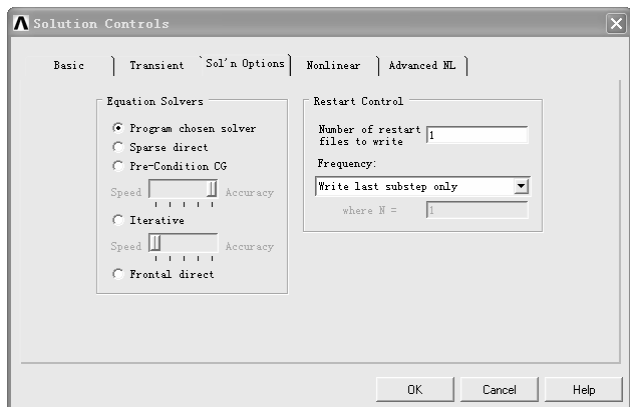


图 3.38 求解控制对话框

step 2 在 Equation Solvers 栏中选择适当的求解器，单击 OK 按钮即可。



还可以选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 命令，弹出 Static or Steady-State Analysis 对话框，在该对话框中进行求解器的选择。

3.4.2 求解

在求解器中，可以定义分析类型和求解控制选项等。对应不同的分析类型，求解器的菜单形式可能会有些不同，比如瞬态分析会出现频率相关选项和阻尼选项等。

3.4.2.1 定义分析类型

进入求解器后，首先要定义求解的类型是静力分析还是瞬态分析，是否考虑非线性影响等。也可以选择开始新的分析或者激活一个已经存在的分析，同时对这些分析进行控制。

通常情况下需要选择开始新的分析，操作如下：

选择 Main Menu→Solution→New Analysis 命令，弹出 New Analysis (新的分析) 对话框，如图 3.39 所示。在该对话框中可以指定分析类型，如 Static (静力分析)、Modal (模态分析)、Harmonic (谐响应分析)、Transient (瞬态分析) 及 Spectrum (谱分析) 等。选定新的分析类型后，单击 OK 按钮确定即可。

单击 OK 按钮后，对应于不同的分析类型，可能会弹出进一步的设定对话框或者出现不同的菜单选项，至于具体的选项设定和解释，可以参看本书后面的相关篇章。

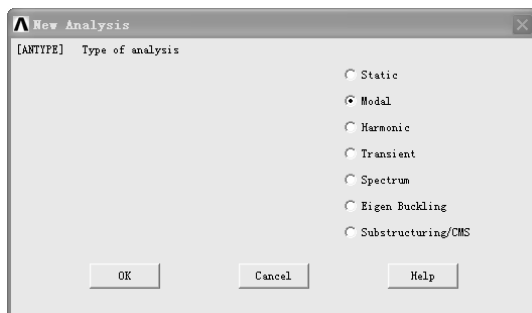


图 3.39 定义分析类型



分析类型默认为静力分析 (Static)，对应求解控制选项菜单也是对应于静力分析的。

3.4.2.2 求解控制

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 命令，弹出 Solution Controls (求解控制) 对话框，如图 3.40 所示。

在瞬态分析时，该对话框中的瞬态选项卡也将有效。在 Basic (基本) 选项卡下的 Analysis Options (分析选项) 控制区中，选择要分析的问题的类型为 Small Displacement Static (小变形静力稳态)、Large Displacement Static (大变形静力稳态)、Small Displacement Transient (小变形瞬态) 和 Large Displacement Transient (大变形瞬态)，默认选项为 Small Displacement Static (小

变形静力分析)。在 Write Items to Results File(结果文件输出项目)控制区中,一般选择 All solution items(所有求解条目)单选按钮,以将所有求解的内容全部输出(选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrl 命令也可以定义求解内容的输出控制,这两者是等效的)。在 Frequency(频率点)控制区中,一般选择 Write every substep(输出所有子步)选项(是在定义有多个载荷子步的情况下)。

在 Basic 选项卡中还提供了载荷步的设置选项,这些选项和本章前面所讲述的含义及作用都是相同的,在此不再赘述。

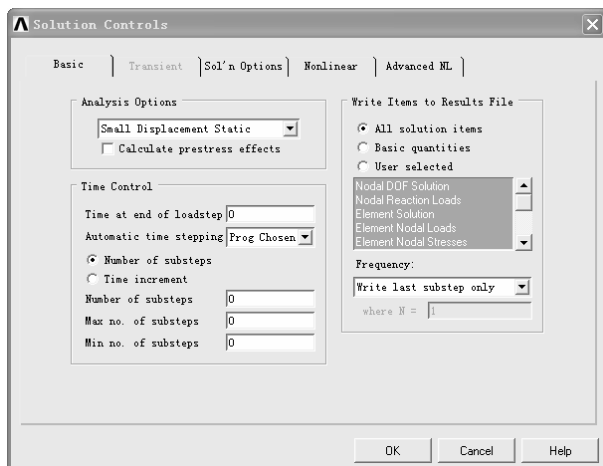


图 3.40 求解控制对话框

在 Sol'n Options(求解选项)选项卡(如图 3.41 所示)下提供了 Equation Solvers(方程求解器)的选项,以供选择求解有限元联立方程的求解器。一般选择 Program chosen solver 选项,使方程求解器由程序来自动选定。

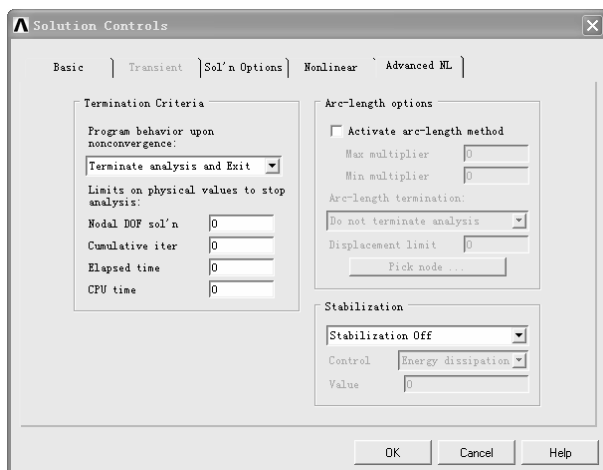


图 3.41 求解选项控制卡

在 Advanced NL(高级)选项卡中(如图 3.42 所示),值得注意的是有一个菜单控制按钮,该按钮控制是否精简有关菜单项。一般情况下,这些被精简的菜单项可能并不会被用到,比如在静力分析时的载荷步选项等,但在瞬态分析等需要用到载荷步选项菜单时,可以单击该按钮使因被精简而隐藏的菜单项显示出来。该按钮是一个开关式按钮,再单击一次,精简菜单项将又会被隐藏起来。

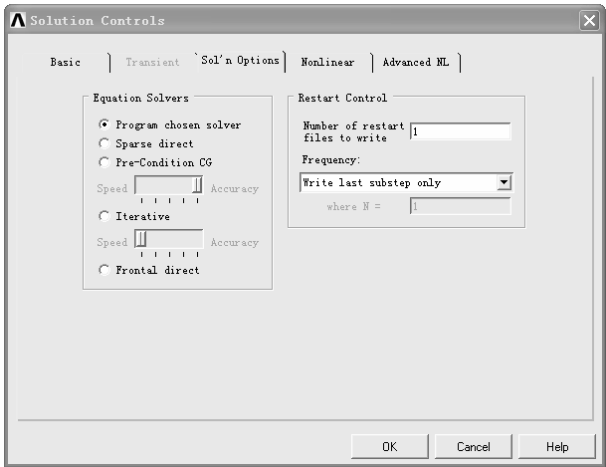


图 3.42 高级选项卡



需要注意的是，求解控制菜单项并不是在所有分析类型中都可用。

3.4.2.3 分析选项

通常情况下，选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 命令，在弹出的对话框中单击 Advanced NL 选项卡中的 **Abridged Menu** 按钮后，才会出现分析选项菜单项。在保证将精简菜单展开之后，选择 Main Menu→Solution→Analysis Options 命令，会弹出分析选项对话框。这些选项在具体的分析类型中有着不同的设置项，因此，对应于具体的分析类型，可以参考本书后面的相关篇章和 ANSYS 的在线帮助。

3.4.2.4 进行求解

对于通常的单载荷步的问题，如大部分的静力分析问题，可以直接通过以下方法进行求解：

选择 Main Menu→Solution→Current Ls 命令。

本节将着重讲述多载荷步问题的求解。多载荷步问题的求解可以采用以下两种方法。

- ◆ 载荷步文件法。
- ◆ 多步求解法。

载荷步文件法需要用到在 3.1.2 节中介绍的载荷步文件。该方法通过一条命令依次读入每个档并分别解答。使用该方法的具体步骤如下。

- step 1** 定义载荷步。
- step 2** 写载荷步文件。
- step 3** 重复前两个步骤，直到所有载荷步文件写入完毕。
- step 4** 选择 Main Menu→Solution→Solve→From Ls Files 命令，弹出 Solve Load Step Files（求解载荷步文件）对话框，如图 3.43 所示。



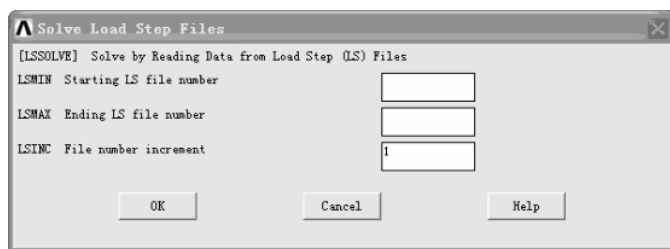


图 3.43 求解载荷步文件

step 5 在 Starting LS file number (起始载荷步文件编号) 文本框中输入起始载荷步文件号, 在 Ending LS file number (结束载荷步文件编号) 文本框中输入结束载荷步文件编号, 在 File number increment (文件号增量) 文本框中输入文件号之间的增量。其中, 文件号即写出载荷步文件时所指定的编号, 对应于文件名 Jobname.S0n 中的 n。设置完毕后单击 OK 按钮, 即可开始多载荷步的求解。

这种方法的缺点是一旦开始求解, 就不能对某个载荷步进行修改, 只有等待所有载荷步求解完毕。这种方法适用于批处理。

也可以通过命令方式 (LSSOLVE) 执行多载荷步文件的求解, 其实该命令是一条宏指令, 它按顺序读取指定的载荷步文件, 并根据读取的载荷文件进行求解。

另一种方法是使用多步求解法求解, 这种方法是最直接的, 它在每个载荷步定义好后执行 SOLVE 命令。这种方法的主要缺点就是不能批处理。使用这种方法的步骤如下。

step 1 定义当前载荷步的载荷工况。

step 2 执行 SOLVE (GUI: Main Menu → Solution → Current Ls) 命令求解当前载荷步。

step 3 重复前两个步骤, 直至所有载荷步都被定义并求解。

3.5 小结

本章主要讲解了 ANSYS 基本流程中的加载和求解的步骤, 由于不同的问题对应着不同的边界条件及载荷, 所以本章只对各类分析所通用的内容进行讲解。施加载荷和求解都是有限元分析中十分重要的部分, 通过本章的学习, 我们对 ANSYS 中的载荷有了全新的认识, 并对载荷步选项有了全面的了解, 同时熟练掌握了 ANSYS 的求解方法, 对特定的求解器、多载荷步求解等内容有了较为全面的了解。但是, 用户只有通过对 ANSYS 实例的不间断练习, 才能真正熟练掌握加载和求解的方法。



第 4 章 结果后处理

本章包括

- ◆ 后处理求解器简介
- ◆ 通用后处理器 (POST1)
- ◆ 时间历程后处理器 (POST26)

建立有限元模型并进行求解之后，读者更关心的是所求解的问题的答案：将该结构投入使用是否安全？构件某个区域的应力是多大？零件的温度如何随时间变化？通过模型表面的热损失是多少？流过该装置的磁通量如何？等等。**ANSYS** 程序的结果后处理功能会帮助我们回答上述问题。可见，后处理是有限元分析的一个很重要的过程。后处理分析的目的就是得到分析结果，所以对结果的观察的好坏程度也就决定了分析的成败，有些分析结果需要自己判断是否符合要求。

本章将概括性地介绍 **ANSYS** 的后处理功能。通过本章的学习，读者可以了解 **ANSYS** 通用后处理器 (**POST1**) 及时间历程后处理器 (**POST26**) 的使用方法，掌握对分析结果进行各种后处理的技能。

4.1 后处理求解器简介

ANSYS 有限元后处理有两种后处理器，分别是通用后处理器 **POST1** 和时间历程后处理器 **POST26**。通用后处理器可用图形和列表显示结果。静态问题一般用通用后处理器就可以了。时间历程后处理器可用于分析动态问题的求解结果。

ANSYS 求解完以后将结果数据保存在结果文件中，对不同的分析类型，结果文件后缀也不一样，如下所示。

- ◆ 结构分析 Jobname.RST。
- ◆ 热分析 Jobname.RTH。
- ◆ 磁场分析 Jobname.RMG。
- ◆ FLPRTTRAN 分析 Jobname.RFL。

后处理从这些结果文件中读取数据，这些数据包括基本数据和导出数据。

- ◆ 基本数据，包括每个节点的各自由度数据，如结构分析中节点的位移等。
- ◆ 导出数据，是从基本数据计算出的数据，如结构分析中的应力和应变等。

表 4.1 列出了各种分析的基本数据和导出数据。

表 4.1 各种分析的基本数据和导出数据

分析类型	基本数据	导出数据
结构分析	位移	应力、应变、反力等
热分析	温度	热流量、热流梯度等
流场分析	速度、压强	压力梯度、热流量等
电场分析	电势	电流密度等
磁场分析	磁势	磁通量、磁流密度等

4.2 通用后处理器（POST1）

通用后处理器可用图形和列表来显示结果，如用图形显示变形情况，用图形和列表显示各种应力和应变等。通用后处理器显示的结果不随时间的变化而变化，只是显示在空间域上的变化情况。通用后处理器可以进行以下几种项目的操作。

- ◆ 图形显示。
- ◆ 列表显示。
- ◆ 路径操作。
- ◆ 定义单元表。
- ◆ 载荷工况。

选择 Main Menu→General Postproc 命令，进入通用后处理器，通用后处理器菜单如图 4.1 所示。在进行后处理前，首先需要读入结果数据，然后才能对结果数据进行处理和分析。

选择 Main Menu→General Postproc→Read Results 命令，可以打开 Read Results 菜单读入数据，读入数据后可以对数据进行观察和操作。Read Results 菜单如图 4.2 所示。

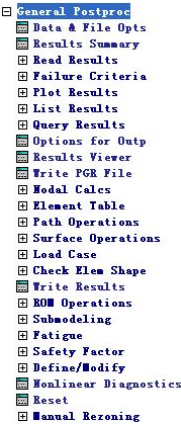


图 4.1 通用后处理器菜单



图 4.2 Read Results 菜单

该菜单中包括如下命令。

- ◆ **First Set:** 读入第一个载荷步。
- ◆ **Next Set:** 读入下一个载荷步。
- ◆ **Previous Set:** 读入上一个载荷步。
- ◆ **Last Set:** 读入最后一个载荷步。
- ◆ **By Pick:** 选取子步然后读入。
- ◆ **By Load Step:** 通过载荷步和子步读取数据。
- ◆ **By Time/Freq:** 通过设置时间或频率点来读取结果到数据库中。
- ◆ **By Set Number:** 通过数据组号读入数据。

选择 **Main Menu→General Postproc→Data&File Opts** 命令，可以从结果文件中选择要读入的数据结果，可以选择所有的项目、基本项目、节点自由度、节点反力、单元解等要读入的项目。还可以选择从单个结果文件读入或从多个文件读入，若选择从多个文件读入，就会出现结果文件列表，可以添加多个结果文件用于读入数据。

选择 **Main Menu→General Postproc→Results Summary** 命令，可以查看数据结果概况。

选择 **Main Menu→General Postproc→Reset** 命令，可以重置读入的数据结果。

下面将对通用后处理中常用的图形显示结果、列表显示结果、动画显示结果和载荷工况等进行简要介绍。

4.2.1

图形显示结果

图形显示结果能直观地表现出求解结果。通用后处理器可以输出下列类型的图形：

- ◆ 变形图。
- ◆ 等值线图。
- ◆ 矢量图。
- ◆ 路径图。
- ◆ 反力图。
- ◆ 粒子流轨迹图和带电粒子轨迹图。
- ◆ 混凝土断裂和压碎图。

选择 **Main Menu→General Postproc→Plot Results** 命令，打开的菜单如图 4.3 所示。

1. 变形显示

选择 **Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape** 命令，弹出 **Plot Deformed Shape** 对话框，如图 4.4 所示。

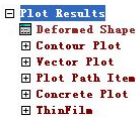


图 4.3 Plot Results 菜单

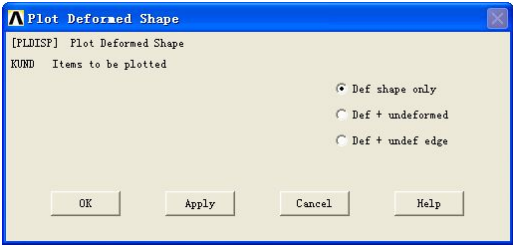


图 4.4 Plot Deformed Shape 对话框

该对话框中各选项的功能如下。

- ◆ Def shape only: 只显示变形。
- ◆ Def+undeformed: 显示变形和未变形。
- ◆ Def+undef edge: 显示变形和未变边界。

可以选择其中的一个单选按钮，按相应格式来显示变形结果。

图 4.5 所示是选择 Def+undeformed 单选按钮后的变形显示结果。

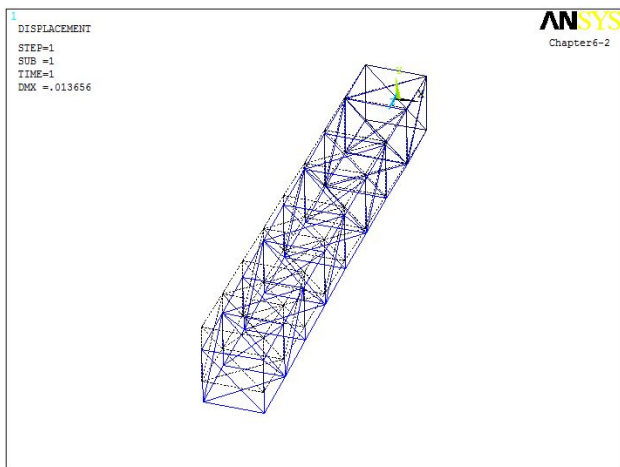


图 4.5 变形显示结果

可以调节变形图的显示比例，选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Style→Displacement Scaling** 命令，弹出位移显示放大对话框，如图 4.6 所示，在该对话框中可以设置放大因子。

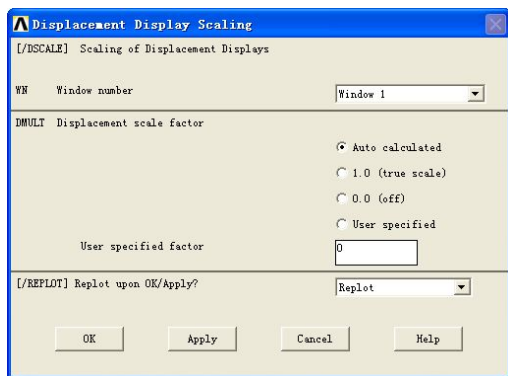


图 4.6 Displacement Display Scaling 对话框

2. 等值线图

等值线图用于显示应力、温度等求解结果在模型不同位置的变化。选择 **Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot** 命令，弹出的 Contour Plot 子菜单如图 4.7 所示。



图 4.7 Contour Plot 子菜单

1) Nodal Solu 命令

Nodal Solu 命令用于显示节点上的基本数据或导出数据。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，如图 4.8 所示。

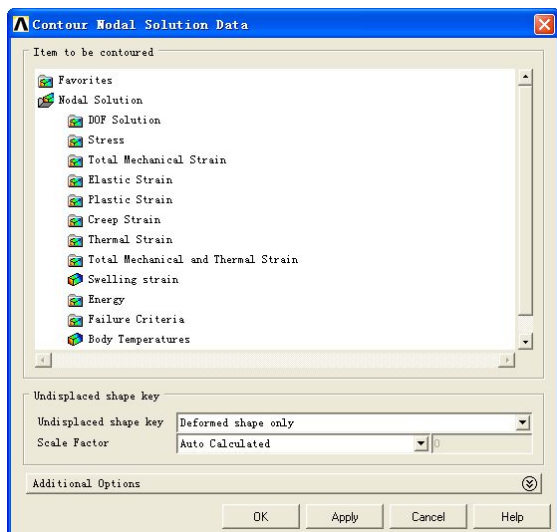


图 4.8 Contour Nodal Solution Data 对话框

其中，Item to be contoured 栏可以显示自由度解、应力、总的机械应变、弹性应变、塑性应变、蠕变应变、热应变、总的机械和热应变、膨胀应变、能量、失效准则、体的温度等。DOF Solution 可以显示 X 和 Y 方向的位移与位移矢量总和。Stress 可以显示 X、Y、Z 方向上的正应力，XY、YZ、ZX 方向上的切应力，第一、第二、第三主应力，等效应力 Von Mises 应力等。应变也可以显示 X、Y、Z 方向上的正应变，XY、YZ、ZX 方向上的切应变，第一、第二、第三主应变，等效应力 Von Mises 应变等。

Undisplaced shape key 默认为 Deformed shape only，该下拉列表框中包含以下选项。

- ◆ Undisplaced shape key: 只显示变形后的结构。
- ◆ Deformed shape with undeformed model: 显示等值线图和未变形的结构。
- ◆ Deformed shape with undeformed edge: 显示等值线图和未变形的结构边缘。

Scale Factor 可以设置缩放比例，默认为 Auto Calculated。该下拉列表框中包含以下选项。

- ◆ Auto Calculated: 自动计算。
- ◆ True Scale: 真实的值。
- ◆ User Specified: 用户指定。
- ◆ Off: 关闭。

单击 Additional Options 后面的向下箭头，还可以进行其他的一些设置。

Von Mises 等效应力显示结果如图 4.9 所示。

2) Element Solu 命令

Element Solu 命令用于绘制单元解的等值线。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Element Solu 命令，弹出 Contour Element Solution Data 对话框，如图 4.10 所示，对话框中各选项的含义可以参照上面 Contour Nodal Solution Data 对话框的介绍。

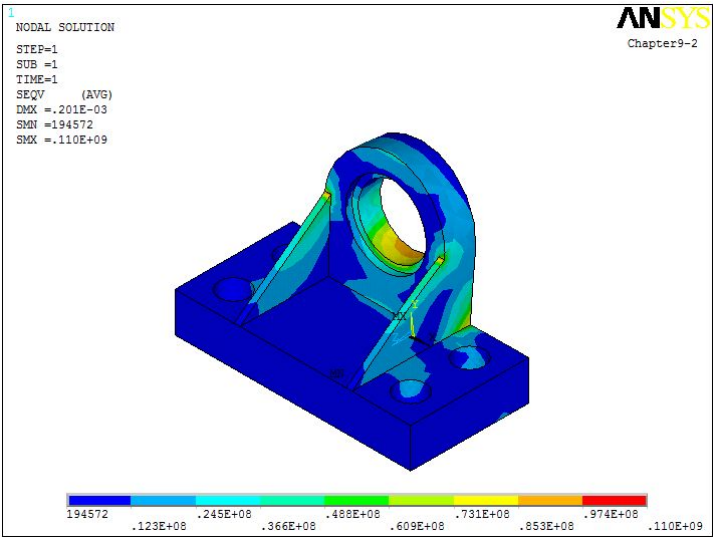


图 4.9 Von Mises 等效应力显示结果

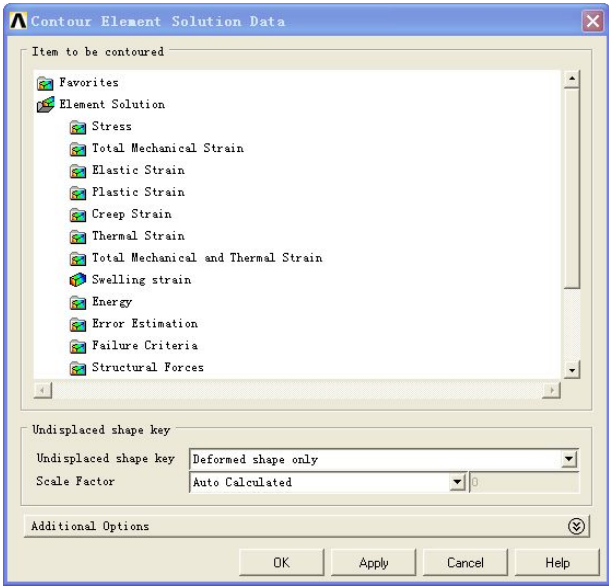


图 4.10 Contour Element Solution Data 对话框

3) Elem Table 命令

Elem Table 命令用于显示单元表数据的等值线图。

4) Line Elem Res 命令

Line Elem Res 命令用于显示线单元的等值线图。

3. 矢量图

矢量图是用箭头显示模型中某个矢量的大小和方向的变化。选择 Main Menu→General

Postproc→Plot Results→Vector Plot →Predefined 命令，弹出 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框，如图 4.11 所示。

其中，Vector item to be plotted 列表框用于选择输出的矢量。

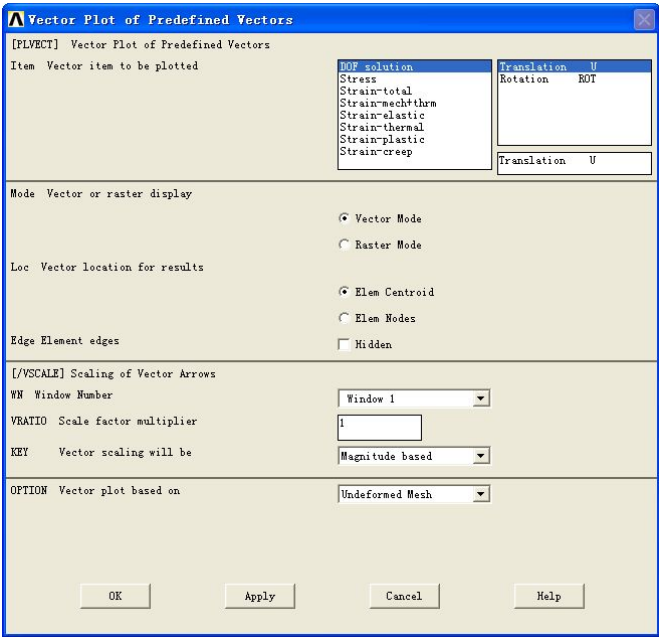


图 4.11 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

Vector or raster display 为矢量或光栅模式显示，它包括如下两个单选按钮。

- ◆ Vector Mode: 矢量模式，默认选项。
- ◆ Raster Mode: 光栅模式。

Vector location for results 结果箭头的位置，它包括两个单选按钮。

- ◆ Elem Centroid: 箭头位于单元质心，默认选项。
- ◆ Elem Nodes: 箭头位于节点处。

Element edges 复选框用于设置是否隐藏单元边缘。

Scale factor multiplier 用于输入箭头缩放比例。

Vector scaling will be 下拉列表框中有如下两个选项。

- ◆ Magnitude based: 按矢量的大小设定箭头的长度。
- ◆ Uniform: 所有箭头设为同样的长度。

Vector plot based on 下拉列表框中有如下两个选项。

- ◆ Undeformed Mesh: 基于未变形的网格。
- ◆ Deformed Mesh: 基于变形后的网格。

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Vector Plot→User-defined 命令，弹出

Vector Plot of User-defined Vectors 对话框，如图 4.12 所示。

在该对话框中，I-component of vector 用于设置用户定义的矢量的 i 分量。

J-component of vector 用于设置用户定义的矢量的 j 分量。

K-component of vector 用于设置用户定义的矢量的 k 分量。

User label for resultant 用于设置矢量的标志。

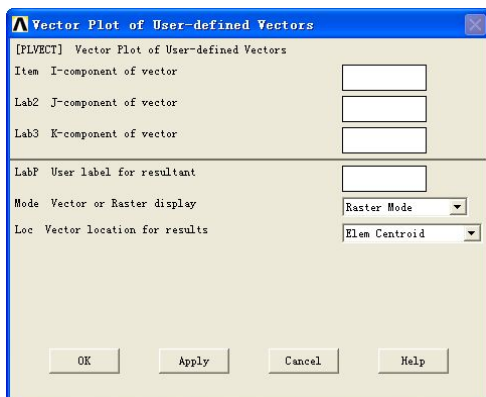


图 4.12 Vector Plot of User-defined Vectors 对话框

4. 混凝土断裂和压碎图

对 SOLID65 单元模拟混凝土的受力，选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Concrete Plot 命令以生成混凝土断裂和压碎图，弹出的对话框如图 4.13 所示。在生成的混凝土断裂和压碎图中，小的圆圈表示混凝土有断裂的部位，八角形符号表示压碎的部位。



图 4.13 Cracking and Crushing Locations in Concrete Elements 对话框

在这种情况下应使用线框模式，打开线框模式的方法为：选择 PlotCtrls→Device Options 命令，在弹出的对话框中选中 Vector mode (wireframe) 复选框，如图 4.14 所示。

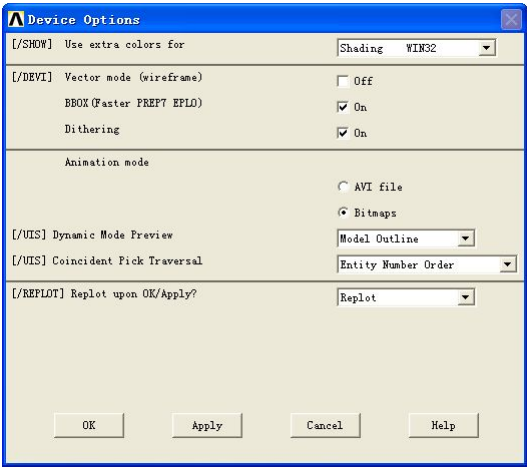


图 4.14 Device Options 对话框

4.2.2

单元表

单元表就是由一系列单元数据组成的数据集。单元表相当于一个电子表格，每一行代表了一个单元，每一列代表了该单元的项目数据，如单元的体积、中心、平均应力等。在 ANSYS 中，单元表有两个用处，即访问用其他方法无法访问的数据和作为数学运算的数据源。进入单元表菜单的方法为：选择 Main Menu→General Postproc→Element Table 命令，在打开的菜单中可以对单元表进行定义、操作、显示等，如图 4.15 所示。



图 4.15 Element Table 菜单

1. 单元表的定义
- 选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table 命令,弹出 Element Table Data 对话框，如图 4.16 所示，单击 Add 按钮，弹出 Define Additional Element Table Items 对话框，如图 4.17 所示。

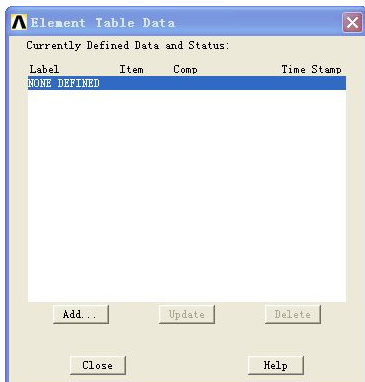


图 4.16 Element Table Data 对话框

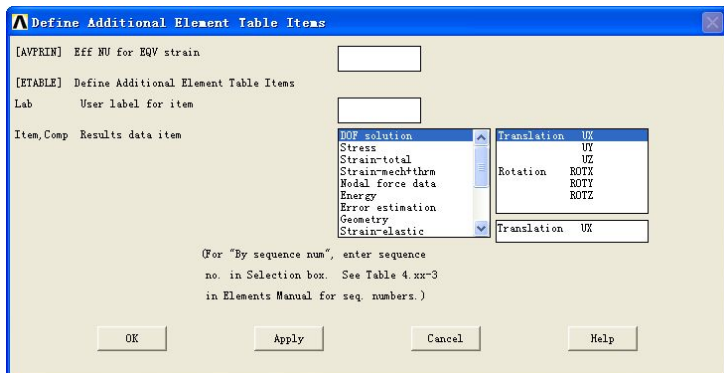


图 4.17 Define Additional Element Table Items 对话框

2. 单元表的操作

选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→Plot Elem Table 命令，以图形显示单元表，与 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Element Table 相同。

选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→List Elem Table 命令，以列表显示单元表，与 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Element Table 相同。

选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→Erase Table 命令，删除单元表。

3. 数学运算

利用单元表可以对数据库中的结果数据进行数学运算，步骤如下。

- step 1** 定义数据。
- step 2** 数学操作。
- step 3** 列表显示结果或图形显示结果。

可以进行以下数学运算。

- ◆ Abs Value Option: 绝对值。
- ◆ Sum of Each Item: 各个项目相加。
- ◆ Add Items: 增加项目。
- ◆ Multiply: 相乘。
- ◆ Find Maximum: 寻找最大值。
- ◆ Find Minimum: 寻找最小值。
- ◆ Exponentiate: 指数。
- ◆ Cross Product: 叉积。
- ◆ Dot Product: 点积。

4.2.3 列表显示结果

通过列表显示可以列出节点、单元、反力、单元表以及其他数据。列表显示菜单如图 4.18 所示。

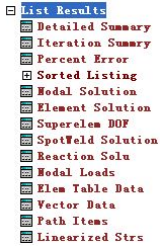


图 4.18 List Results 菜单

1. 列表显示节点和单元数据

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution 命令，可以列表显示节点数据。弹出的对话框如图 4.19 所示。

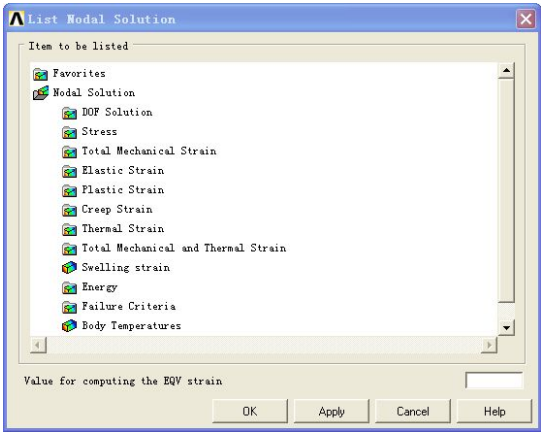


图 4.19 List Nodal Solution 对话框

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Element Solution 命令，可以列表显示单元数据。弹出的对话框如图 4.20 所示。

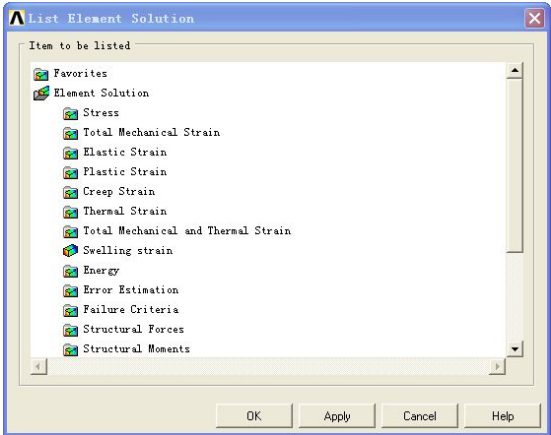


图 4.20 List Element Solution 对话框

2. 反力和施加的外载

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solution 命令，可以列表显示反力数据，弹出的对话框如图 4.21 所示。其中，在 Item to be listed 列表框中可以选择所有的项目、XYZ 方向上的结构力、所有的结构力、XYZ 方向上的结构弯矩以及所有结构弯矩。



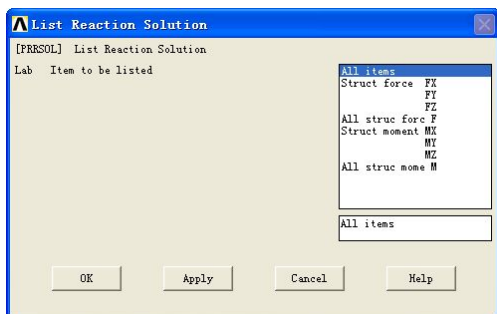


图 4.21 List Reaction Solution 对话框

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Loads 命令，可以列表显示反力数据。弹出的对话框如图 4.22 所示。

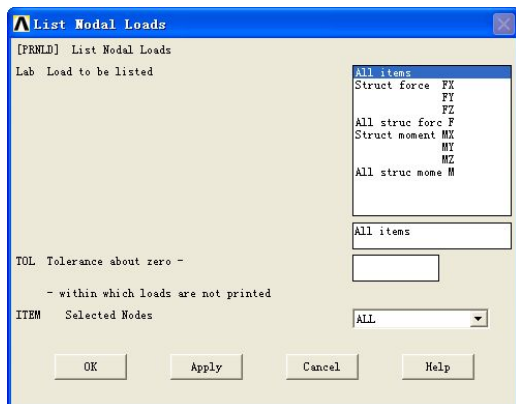


图 4.22 List Nodal Loads 对话框

3. 单元表数据

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Elem Table Data 命令，可列出保存在单元表中的数据。也可以选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→List Elem Table 命令来实现。

4. 列出其他数据

其他类型的列表显示方法如下所示。

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Vector Data 命令，可列出所选单元指定的矢量大小和方向余弦。

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Path Items 命令，可计算并列出沿几何路径的制定数据。

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Linearized Strs 命令，可计算并列出沿路径线性变化的应力。

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Percent Error 命令，可列出单元能量形式的百分误差。

选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Iteration Summary 命令，可列出迭代次数的数据。

5. 单元节点排序

在默认情况下,列表是按节点或单元的升序排列的,可以选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Sorted Listing 命令,分别对节点或单元进行排序。Sorted Listing 菜单如图 4.23 所示。



图 4.23 Sorted Listing 菜单

其中,各菜单项的功能分别说明如下。

◆ Sort Nodes: 按指定的节点求解项目对节点进行排序,Sort Nodes 对话框如图 4.24 所示。

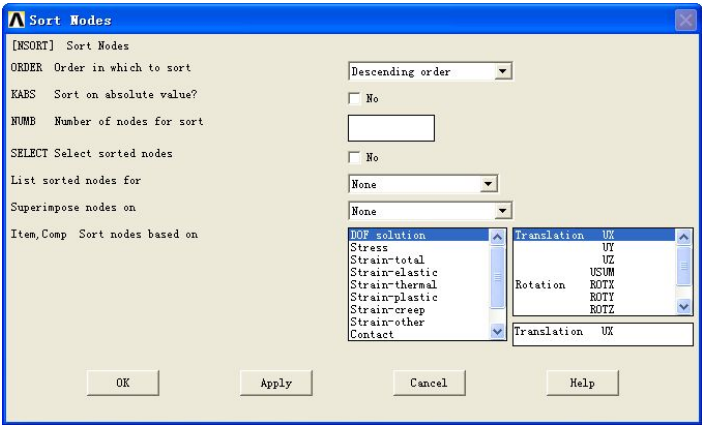


图 4.24 Sort Nodes 对话框

其中,Order in which to sort 设置项目是升序 (Ascending order)还是降序 (Descending order)排列;Sort on absolute value 设置是否按绝对值排序;Number of nodes for sort 是选择需要重新排序的节点数,这些节点将按照选择的顺序排序,剩下的通过默认的方式进行排序;Select sorted nodes 设置在排序时是否进行选择;List sorted nodes for 列出与选定节点相关的项目,如结果值和坐标值;Superimpose nodes on 是在图形窗口显示选定的节点;Sort nodes based on 选定用于排序的项目。

◆ Unsort Nodes: 恢复节点原来的顺序。

◆ Sort Elems: 按指定的节点求解项目对单元进行排序,Sort Elements 对话框如图 4.25 所示。

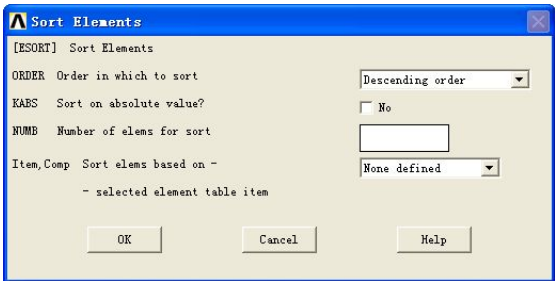


图 4.25 Sort Elements 对话框

◆ **Unsort Elms:** 用于恢复单元原来的顺序。

4.2.4 路径操作

路径图可以显示出某结果数据沿模型上的某一预定义路径的变化图。路径操作的步骤如下。

- ◆ 定义路径。
- ◆ 映射路径。
- ◆ 路径变量操作与路径变量显示。

路径操作菜单如图 4.26 所示。

1. 路径的定义

1) 定义路径

路径定义菜单如图 4.27 所示，关于路径的定义有以下几种情况。

- ◆ **By Nodes:** 通过节点定义路径。
- ◆ **On Working Plane:** 通过工作平面定义路径。
- ◆ **By Location:** 通过坐标点位置定义路径。
- ◆ **Path Status:** 可以查看路径情况，选择 **Defined Paths** 选项将显示所有已经定义的路径，选择 **Current Path** 选项则显示当前的路径。
- ◆ **Modify Path:** 修改路径上的点。
- ◆ **Path Options:** 定义路径点间分段点的插补方式。



图 4.26 路径操作菜单

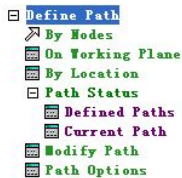


图 4.27 路径定义菜单

2) 路径的显示

选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Path Operations**→**Plot Paths** 命令，可以图形显示路径。该功能与显示路径变量不同，它只显示单纯的路径，不涉及映射的结果变量。

3) 删除路径

选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Path Operations**→**Delete Path**→**By Name** 命令，可通过名称删除路径。

选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Path Operations**→**Delete Path**→**All Paths** 命令，可删除所

有的路径。

4) 设置当前路径

可以设置多个路径， 选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Recall Path 命令，可以把以前设置的路径设置为当前路径。

5) 单位向量

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Unit Vector 命令，可定义沿路径的法向量、切向量或位置向量。

2. 将结果映射到路径上

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path 命令，可将结果数据映射到路径上。Map Result Items onto Path 对话框如图 4.28 所示，这样就建立了对应关系。

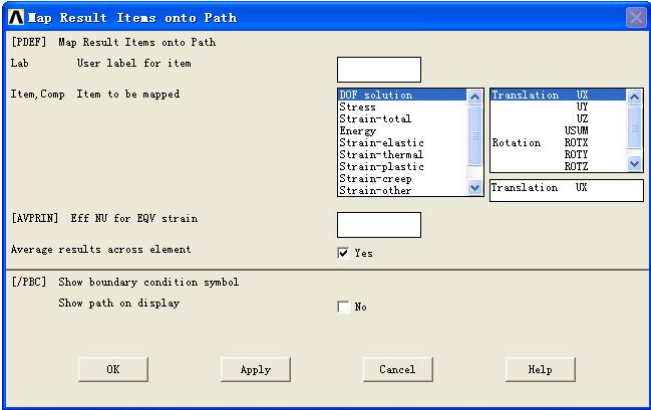


图 4.28 Map Result Items onto Path 对话框

在创建路径时，系统自动把以下 4 个几何量映射到路径：全局坐标系下的坐标值 XG、YG、ZG，以及从第一个路径点开始的沿路径的距离 S。在图形显示中，通常可以以其中的一个量作为横坐标。

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Clear Path Items 命令，可清除所有映射到路径上的结果变量（除了 4 个几何项目 XG、YG、ZG、S 外）。

3. 路径显示

可以对路径变量进行图形显示，也可以列表显示。选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item 命令，可以显示路径变量。

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item→On Graph 命令，可曲线显示路径变量的变化。最多可以同时显示 6 个变量，包括几何参数。

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item→On Geometry 命令，可以等值线方式显示变量的变化。用颜色梯度来表示路径变量的变化。

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item→List Path Item 命令，可列表显示路径项目，一次最多只能显示 6 个变量。

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Item→Path Range 命令，可设置路径的 X 坐标范围。

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Linearized Strs 或 List Linearized 命令，可计算或显示沿某一路径的线性应力。

4. 路径运算

可以对路径变量进行代数运算、微积分运算等，主要有以下运算类型，这些运算所用的变量是当前路径上的变量。

- ◆ **Add:** 两个路径相加。计算表达式为 $\text{LabR} = (\text{FACT1} * \text{Lab1}) + (\text{FACT2} * \text{Lab2})$ ，Lab1 和 Lab2 为两个路径的名称，FACT1 和 FACT2 是变量的乘子。LabR 是结果路径的变量名。
- ◆ **Multiply:** 求两个路径的乘积。
- ◆ **Divide:** 除。
- ◆ **Exponentiate:** 求指数。
- ◆ **Differentiate:** 求微分。
- ◆ **Integrate:** 求积分。
- ◆ **Cosine:** 求余弦。
- ◆ **Sine:** 求正弦。
- ◆ **ArcCosine:** 求反余弦。
- ◆ **ArcSine:** 求反正弦。
- ◆ **Natural Log:** 求自然对数。
- ◆ **Cross Product:** 求矢量的叉积。
- ◆ **Dot Product:** 求矢量的点积。

5. 路径的保存和恢复

1) 保存到数组

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Archive Path→Store→Path in array 命令，可把路径及其变量保存在数组中。弹出的对话框如图 4.29 所示。该对话框中的各单选按钮含义如下。

- ◆ **All information:** 保存所有信息。
- ◆ **POINT-only points:** 仅保存路径点、节点号和点的全局坐标。
- ◆ **TABL-only data:** 仅保存路径的变量值。
- ◆ **LABEL-only labels:** 仅保存路径的标签。

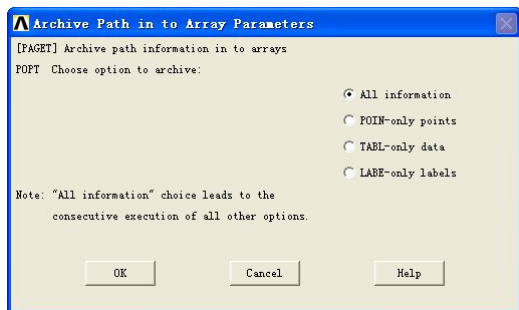


图 4.29 Archive Path in to Array Parameters 对话框

2) 保存到文件

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Archive Path→Store→Path in filew 命令，可把路径及其变量保存在文件中。选择 Save all paths 单选按钮，可保存所有的路径，选择

Selected paths 单选按钮，可保存选定的路径。

3) 从数组中恢复

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Archive Path→Retrieve→Path in array 命令，可把路径及其变量从数组中恢复到 POST1 中。

4) 从文件中恢复

选择 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Archive Path→Retrieve →Path in file 命令，可把路径及其变量从保存的文件中恢复到 POST1 中。

4.2.5

动画显示结果

动画显示结果可以更直观地观察结果的变化过程，可以观察细节问题，进行各种演示等。
在菜单栏中选择 PlotCtrls→Animate 命令，打开的动画显示菜单如图 4.30 所示，可以显示变形动画，重新播放、存储和重新调入动画。



图 4.30 Animate 菜单

可以显示以下几种形式的动画。

- ◆ Mode Shape: 变形模式的动画显示。
- ◆ Deformed Shape: 变形等值线动画显示。
- ◆ Over Time: 在一定时间范围内随时间变化的连续等值线动画。
- ◆ Time-harmonic: 生成某瞬时的谐波结果，只能适用于谐波分析。
- ◆ Over Results: 生成一定求解结果范围内的联系等值线动画。
- ◆ Q-Slice Contours: 生成 Q 切片的等值线动画。
- ◆ Q-Slice Vectors: 生成 Q 切片的矢量动画。
- ◆ Isosurfaces: 生成等值线动画序列。
- ◆ Particle Flow: 生成粒子流动画系列。只能在流场或电磁场中使用。

结构分析中经常用到以下动画。

1. 动画显示变形图

选择 PlptCtrls→Animate→Deformed Shape 命令，弹出变形图动画对话框，如图 4.31 所示。在该对话框中可以设置帧的数目和时间，设置好后，单击 OK 按钮，弹出动画和动画控制框，其中各选项的含义如下。

- ◆ No. of frames to create: 创建的帧数，默认为 5。

- ◆ Time delay (seconds): 时间延迟, 默认为 0.5 秒。
- ◆ Plot Deformed Shape: Items to be plotted 输出项目的变形情况显示, 它包括以下 3 个单选按钮。
 - Def shape only: 只显示变形后的结果。
 - Def+undeformed: 显示变形和未变形重叠到一起。
 - Def+undef edge: 显示变形后的体和未变形的边。

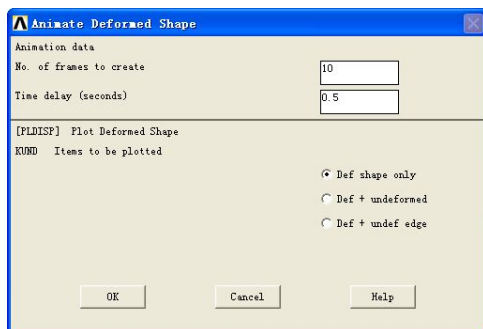


图 4.31 Animate Deformed Shape 对话框

2. 动画显示变形结果

选择 **PltCtrls→Animate→Deformed Results** 命令, 弹出的对话框如图 4.32 所示。在该对话框中可以设置帧的数目和时间。在 **Item to be contoured** 列表框中可以选择节点自由度、应力、总的应变、能量、弹性应变、热应变、塑性应变、蠕变应变、接触、优化、破坏准则等。

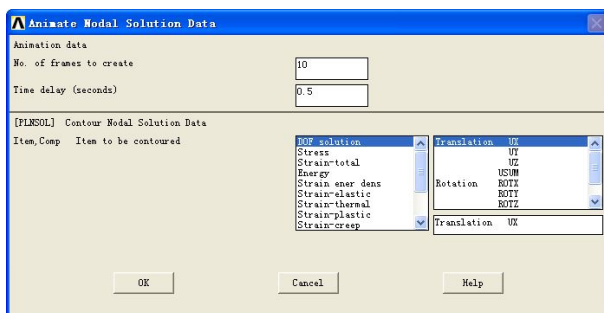


图 4.32 Animate Nodal Solution Data 对话框

3. 动画显示 Q-Slice

所谓 Q 切片, 是通过定义一条曲线, 在曲线的每个点上, 都有一个平面垂直该曲线, 当点在曲线上移动时, 平面将不断变化, 每个平面上的等值线图就形成了随平面变化的动画。可以显示为云图和矢量两种形式。

4.2.6 载荷工况

载荷工况是被赋予了参考号的结果数据集。**ANSYS** 最多允许定义 99 个载荷工况, 但在内存数据库中, 一次只能调入一个载荷工况。载荷工况可以进行创建、读写和操作, 选择 **Main Menu→General Postproc→Load Case** 命令, 打开载荷工况子菜单, 如图 4.33 所示。

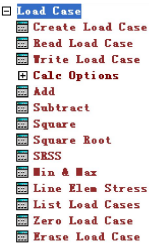


图 4.33 载荷工况子菜单

1. 创建载荷工况

选择 Main Menu→General Postproc→Load Case→Create Load Case 命令，弹出 Create Load Case 对话框，如图 4.34 所示，可以选择从结果文件或载荷工况文件创建载荷工况。

若选择从结果文件创建载荷工况，则弹出如图 4.35 所示的对话框；若选择从载荷工况文件创建载荷工况，则弹出如图 4.36 所示的对话框。



图 4.34 Create Load Case 对话框

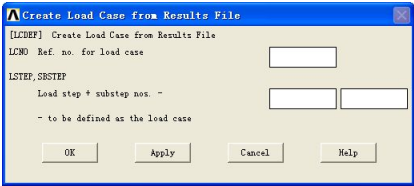


图 4.35 Create Load Case from Results File 对话框

框

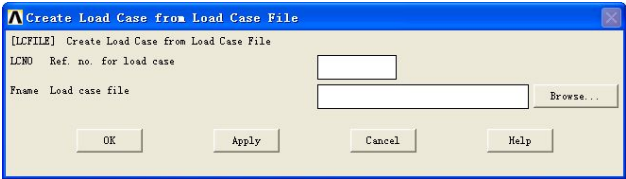


图 4.36 Create Load Case from Load Case File 对话框

2. 读写载荷工况

读载荷工况是把载荷工况读入到内存数据库中。选择 Main Menu→General Postproc→Load Case→Read Load Case 命令，弹出 Read Load Case 对话框，如图 4.37 所示，在其中可以选择载荷工况序号。

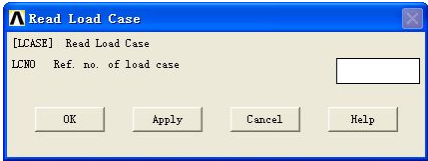


图 4.37 Read Load Case 对话框

写载荷工况是把载荷工况添加到结果文件中。选择 Main Menu→General Postproc→Load Case→Write Load Case 命令，弹出的对话框如图 4.38 所示，可以把载荷工况从数据库导入载荷工况文件中。

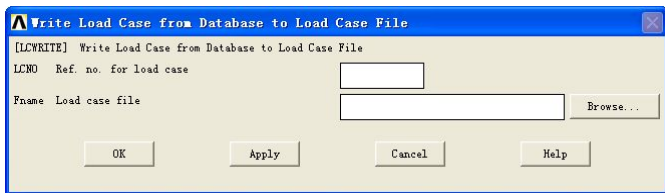


图 4.38 Write Load Case from Database to Load Case File 对话框

3. 载荷工况操作设置

选择 Main Menu→General Postproc→Load Case→Calc Options 命令，在打开的菜单中可以对载荷工况操作进行设置，如图 4.39 所示。



图 4.39 Calc Options 菜单

Calc Options 菜单中的各菜单项功能如下。

- ◆ Sele Ld Cases: 选定载荷工况。
- ◆ Absolut Value: 设置是否使用绝对值。
- ◆ Scale Factor: 定义缩放因子。
- ◆ Stress Options: 设置后续操作中单元应力的求和方式。

4. 载荷工况的组合

可以对载荷工况进行如下数学运算。

- ◆ Add 求和。把载荷工况的数据加到数据库中。
- ◆ Subtract 减。把数据库中的数据减去载荷工况相应的数据。
- ◆ Square 求平方。对数据库内的数据求平方。
- ◆ Square Root 求平方根。对数据库内的数据求平方根。
- ◆ SRSS。对载荷工况与数据库的平方和取平方根。
- ◆ Min&Max。比较载荷工况和数据库内数据的最大值或最小值，并把结果保存在数据库中。
在弹出的对话框中可以选择是比较最大值还是最小值，直接比较还是比较其绝对值。
- ◆ Line Elem Stress。重新计算线性单元的主应力。
- ◆ Zero Load Case 清零。将数据库内的数据清零。

4.2.7 通用后处理器的其他应用

后处理提供了强大的应用功能，除了以上介绍的图形显示、列表显示、单元表、路径、载荷工况外，还有其他的功能，分别介绍如下。

1. 结果查询

当想知道少量的节点或单元数据，或想把节点或单元数据写到模型上时，就需要用到结果查询器。可以查询节点结果和单元解数据，命令分别如下。

选择 Main Menu→General Postproc→Query Results→Nodal Solu 命令，可以查询节点解数据。

选择 Main Menu→General Postproc→Query Results→Element Solu 命令，可以查询单元解数据。

2. 修改结果

选择 Main Menu→General Postproc→Define/Modify 命令, 可以修改结果数据。

选择 Main Menu→General Postproc→Define/Modify→Nodal Results 命令, 可以修改节点结果。

选择 Main Menu→General Postproc→Define/Modify→Elem Results 命令, 可以修改单元结果。

选择 Main Menu→General Postproc→Define/Modify→ElemTabl Data 命令, 可以修改单元表数据。

3. 失效准则

选择 Main Menu→General Postproc→Failure Criteria→Temp Variation 命令, 可以选择与温度有关的实效准则, 可以定义 6 个温度。定义温度后, 可以分别设置在各个温度下的破坏准则。不定义则默认为与温度无关。

选择 Main Menu→General Postproc→Failure Criteria→Add/Edit 命令, 可以定义破坏准则, 若不定义温度, 则选择材料号后会弹出图 4.40 所示的对话框, 可以定义拉压应变、切应变、拉压应力、切应力以及应力耦合系数; 若定义了温度, 选择材料号后会弹出图 4.41 所示的对话框, 可以定义各种应力应变与温度有关的破坏准则。

选择 Main Menu→General Postproc→Failure Criteria→Delete 命令, 可以删除定义的破坏量准则。

选择 Main Menu→General Postproc→Failure Criteria→List 命令, 可以列表显示定义的破坏准则。

选择 Main Menu→General Postproc→Failure Criteria→Criteria Check 命令, 可以用破坏准则检查结果情况是否符合要求。

4. 安全系数

1) 许用应力

选择 Main Menu→General Postproc→Safety Factor→Allowable Strs→Constant 命令, 可以定义许用应力为常数, 不随温度的变化而变化。

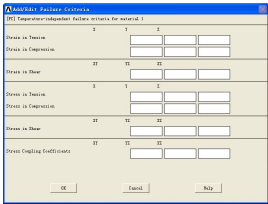


图 4.40 Add/Edit Failure Criteria 对话框

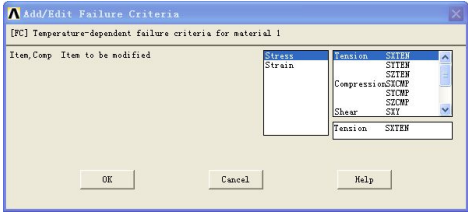


图 4.41 Add/Edit Failure Criteria 对话框

选择 Main Menu→General Postproc→Safety Factor→Allowable Strs→Temp Depend 命令, 可定义与温度有关的许用应力, 可以定义 6 个与温度有关的许用应力。

选择 Main Menu→General Postproc→Safety Factor→Allowable Strs→Reset Stress 命令, 可清除所定义的许用应力, 恢复初始值。

选择 Main Menu→General Postproc→Safety Factor→Allowable Strs→Reset Temps 命令, 可清除所定义的与温度有关的许用应力, 恢复初始值。

2) 节点应力安全系数

选择 Main Menu→General Postproc→Safety Factor→SF for Node Strs 命令, 可计算节点应力安全系数。弹出的对话框如图 4.42 所示。



图 4.42 Safety Factors for Nodal Stresses 对话框

在该对话框中可以选择 **Safety factor (SF)**或 **Margin of safety (MS)**单选按钮，两种情况的计算方法分别如下。

- ◆ $SF = SALLOW / |Stress|$ 。
- ◆ $MS = (SALLOW / |Stress|) - 1.0$ 。

3) 单元表应力安全系数

选择 **Main Menu→General Postproc→Safety Factor→SF for ElemTable** 命令，可以计算单元表应力安全系数，相应的对话框如图 4.43 所示。

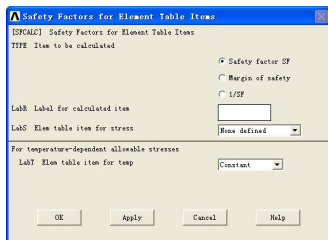


图 4.43 Safety Factors for Element Table Items 对话框

4.3 时间历程后处理器 (POST26)

时间历程后处理器用于检查模型中指定点的求解结果与时间、频率等的关系，通过它可以了解模型中某一点在整个过程中的变化情况。

选择 **Main Menu→TimeHist Postpro** 命令，打开时间历程后处理器菜单，如图 4.44 所示。同时弹出如图 4.45 所示的 **Time History Variables** 对话框，该对话框中集成了变量定义、保存显示、数学运算等功能，几乎包括了时间历程后处理器中所有的功能，与后面介绍的通过菜单方式进行变量定义、保存显示、数学运算等各个命令功能相同。在集成环境中可以更方便地进行操作与观察后处理结果数据。

也可以通过选择 **Main Menu→TimeHist Postpro→Variable Viewer** 命令来打开如图 4.45 所示的对话框。



图 4.44 TimeHist Postpro 菜单

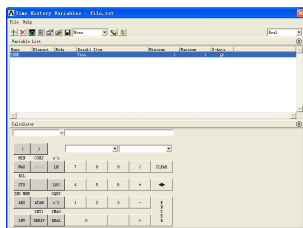


图 4.45 Time History Variables 对话框

Time History Variables 对话框中各选项的含义如下。

1. 工具栏 (Tool Bar)

工具栏可以进行如下功能操作。

- ◆ 增加数据。单击“添加”按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，在其中如图 4.46 所示，在其中可以定义节点解、单元解、反力等变量，与选择 Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables 命令有相似功能。

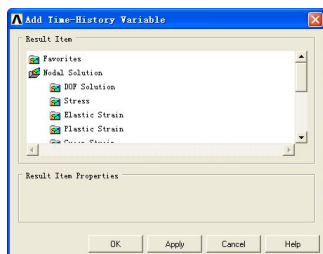


图 4.46 Add Time-History Variable 对话框

- ◆ 删除数据。从变量列表中删除选定的数据。
- ◆ 图形显示数据。通过图形的方式来显示定义的数据。
- ◆ 列表显示数据。通过列表的方式来显示定义的数据。
- ◆ 设置属性。可以设置选定变量和全局变量的属性。
- ◆ 导入数据。通过打开对话框来引入数据。
- ◆ 导出数据。把变量列表中的数据导出到文件中或 APDL 数组中。
- ◆ 清除时间历程数据。清除所有的数据，返回到初始值。
- ◆ 刷新时间历程数据。刷新变量列表，该命令用于定义的变量超出了变量列表显示的范围的情况。
- ◆ 结果查看。在下拉列表框中可选择复变量的输出方式（如实部、虚部、模、相位等）。

2. 变量列表 (Variables List)

显示已经定义的时间历程变量。可以在变量列表中选择和处理变量。可以显示变量的名称、单元号、节点号、结果形式、最大值、最小值、X 轴设置等项。其中，时间或频率是预定义的变量。

3. 计算器 (Calculator)

可以进行变量或函数的定义和计算。单击 INV 按钮可以变换按钮和按钮上显示的功能。通过计算器可以计算最大最小值、指数对数运算、反正切、微积分、产生响应谱、求平方和平方根、求复数的实部和虚部等。

4.3.1 变量定义与存储

1. 定义变量

时间历程后处理器必须首先定义变量，然后才能对变量进行各种操作和显示。选择 Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables 命令，弹出 Defined Time-History Variables 对话框，如图 4.47 所示，可以创建、编辑和删除变量。单击 Add 按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，如图 4.48 所示，可以定义节点自由度结果、单元结果、反力、间隙力、求解概况等变量。

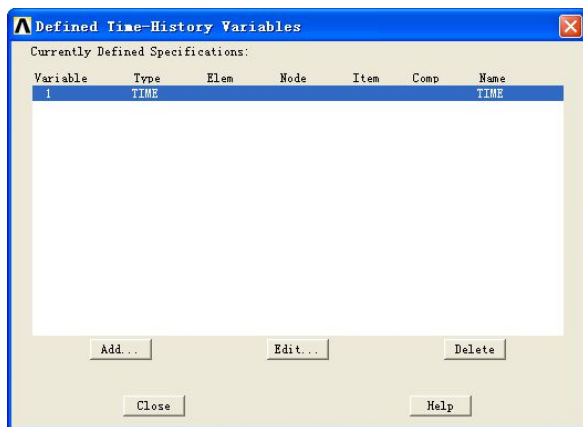


图 4.47 Defined Time-History Variables 对话框

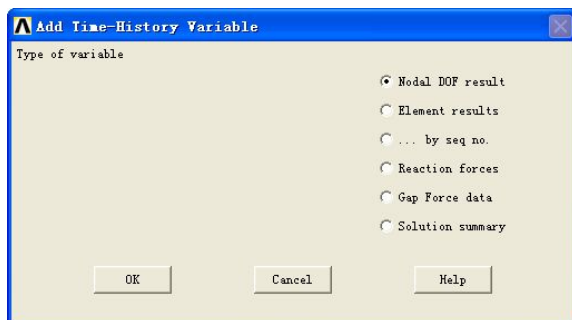


图 4.48 Add Time-History Variable 对话框

2. 存储变量

存储变量就是把结果文件中的数据读入内存数据库，选择 **Main Menu**→**TimeHist Postpro**→**Store Data** 命令，弹出 **Store Data from the Results File** 对话框，如图 4.49 所示。其中，New data will 下拉列表框中有如下 4 个选项。

- ◆ Merge w/existing: 与原数据结合。
- ◆ Replace existing: 替代原数据。
- ◆ Append existing: 附加到原数据后。
- ◆ Allocation only: 只分配空间。

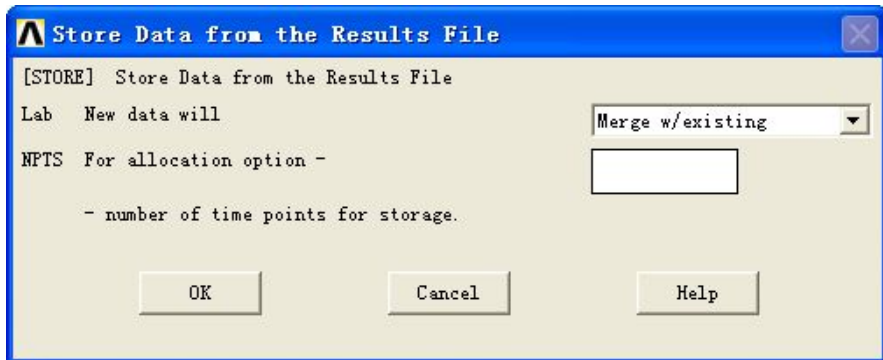


图 4.49 Store Data from the Results File 对话框

4.3.2 变量操作与查看

1. 数学运算

后处理器可以对变量进行一些必要的数学运算。选择 **Main Menu→TimeHist Postpro→Math Operations** 命令，打开的菜单如图 4.50 所示。



图 4.50 Math Operations 对话框

可以进行以下几种数学运算。

- ◆ **Add**: 两个变量相加。
- ◆ **Multiply**: 相乘。
- ◆ **Divide**: 相除。
- ◆ **Absolute Value**: 求绝对值。
- ◆ **Square Root**: 求平方根。
- ◆ **Exponentiate**: 求指数。
- ◆ **Common Log**: 求常用对数。
- ◆ **Nature Log**: 求自然对数。
- ◆ **Derivative**: 求导。
- ◆ **Integrate**: 求微分。
- ◆ **Find Maximum**: 寻找最大值。
- ◆ **Find Minimum**: 寻找最小值。

2. 变量与数组相互赋值

数组（**ARRAY**）和表（**TABLE**）是 ANSYS 提供的两种数据类型，用于存储数据系列。时间历程后处理器中的变量可以保存到数组和表中，或者将数组和表中的数据输入到变量中。实现这些操作的是 **Table Operations**。选择 **Main Menu→TimeHist Postpro→Table Operations** 命令，打开 **Table Operations** 菜单，各菜单项的含义如下。

- ◆ **Variable to Par**: 将时间历程变量存储到数组参数中。
- ◆ **Parameter to Var**: 将数组参数的值输出到变量中。
- ◆ **Fill Data**: 将数据按等差数列的形式填充到变量中去。

3. 数据平滑

用多项式对曲线对数据点进行拟合，如果数据带有噪声，就需要进行平滑操作，以获得有代表性的曲线。选择 **Main Menu→TimeHist Postpro→Smooth Data** 命令，弹出 **Smoothing of Noisy Data** 对话框，如图 4.51 所示。

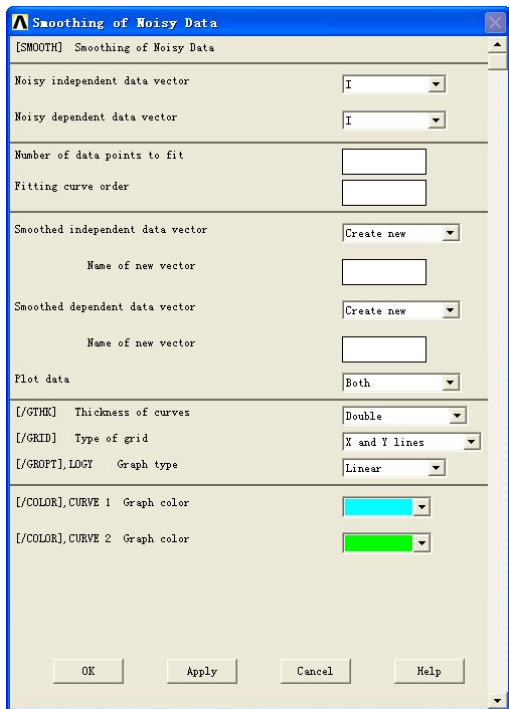


图 4.51 Smoothing of Noisy Data 对话框

4. 产生响应谱

选择 Main Menu → TimeHist Postpro → Generate Spectrum 命令，弹出如图 4.52 所示的 Generate a Response Spectrum 对话框。在该对话框中进行相应设置可以产生响应谱。

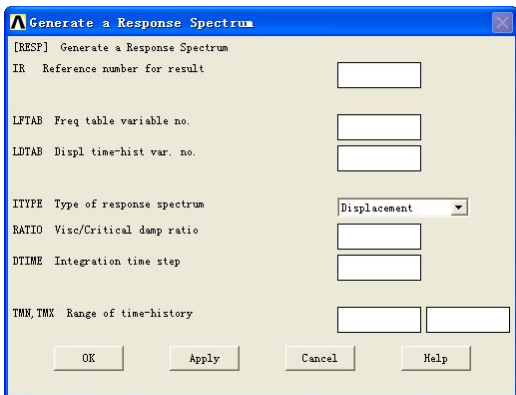


图 4.52 Generate a Response Spectrum 对话框

4.3.3 结果图形显示与列表

完成变量定义后，就可以对变量进行列表显示或绘制变量的变化曲线图。

1. 图形显示结果

选择 Main Menu → TimeHist Postpro → Graph Variables 命令，弹出 Graph Time-History Variables 对话框，如图 4.53 所示，可以显示 10 个变量。在以图形显示变量前，可以设置各种显

示方式，包括坐标轴、曲线、栅格等的显示方式。某实例图形的显示结果如图 4.54 所示。

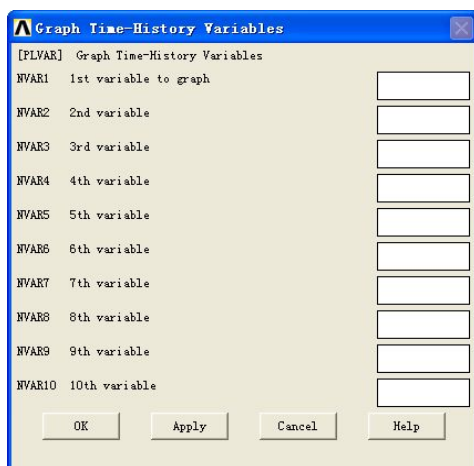
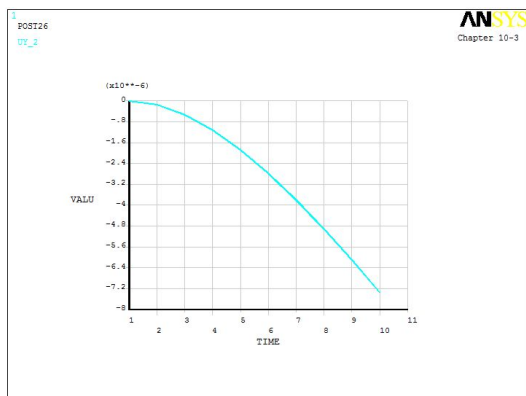
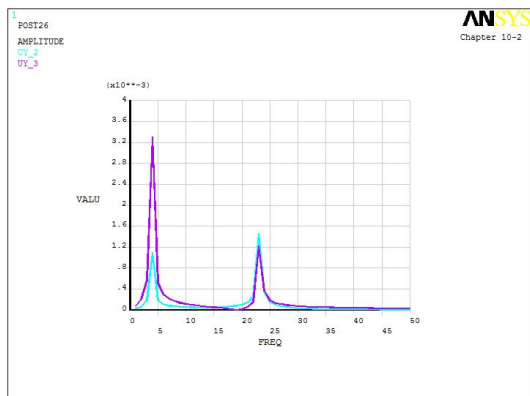


图 4.53 Graph Time-History Variables 对话框



a) 时域曲线



b) 频域曲线

图 4.54 图形显示结果

1) 设置坐标轴显示方式

选择 Utility Menu → PlotsCtrls → Style → Graphs → Modify Axes 命令，弹出 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，如图 4.55 所示。

在该对话框中可以进行如下设置。

- ◆ X-axis label: 设置 X 轴的标签。
- ◆ Y-axis label: 设置 Y 轴的标签。
- ◆ Thickness of axes: 设置轴的厚度。
- ◆ Number of Y-axes: Y 轴的数量。
- ◆ X-axis range: 设置 X 轴的范围。
- ◆ Y-axis range: 设置 Y 轴的范围。
- ◆ X-axis scale: 设置 X 轴是线性的还是对数的，可以选择线性 **Linear** 或对数 **Logarithmic** 选项。

◆ **Y-axis scale:** 设置Y轴是线性的还是对数的。

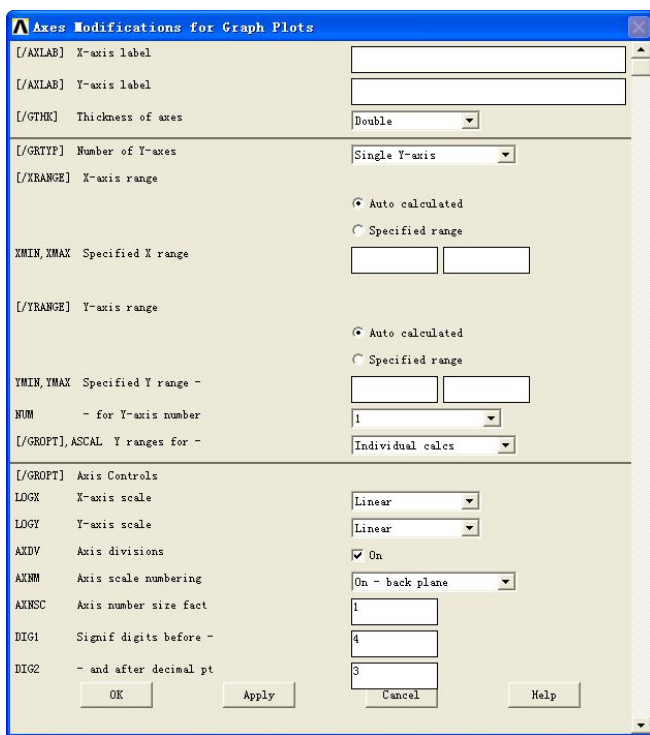


图 4.55 Axes Modifications for Graph Plots 对话框

2) 设置曲线显示方式

选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Style**→**Graphs**→**Modify Curve** 命令，弹出如图 4.56 所示的 **Curve Modifications for Graph Plots** 对话框。该对话框中的各选项含义如下。

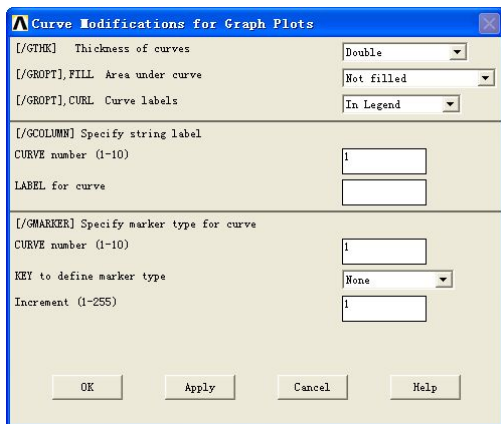


图 4.56 Curve Modifications for Graph Plots 对话框

- ◆ **Thickness of curves:** 设置曲线的厚度。
- ◆ **Area under curve:** 曲线下的面积填充方式，可以选择没有填充或用颜色填充，默认设置为没有填充。
- ◆ **Curve labels:** 设置显示曲线标签的位置，可以选择在长度方向上或曲线附近显示，默认

是在长度方向上显示标签。

- ◆ **Specify string label:** 指定曲线标签，可以分别指定 1-10 个曲线的标签。
- ◆ **Specify marker type for curve:** 指定曲线的标记方式，可以选择没有特殊标记、三角形、四边形、菱形、十字形等标记方式，默认选择没有特殊标记。

3) 设置栅格显示方式

选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Grid 命令，弹出如图 4.57 所示的 Grid Modifications for Graph Plots 对话框，在其中可以进行以下设置。

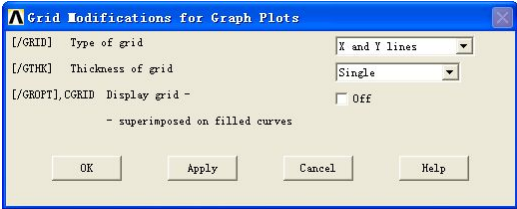


图 4.57 Grid Modifications for Graph Plots 对话框

- ◆ **Type of grid:** 定义栅格显示方式，可以选择不显示栅格、X 轴和 Y 轴显示栅格、只有 X 轴显示栅格、只有 Y 轴显示栅格等显示方式，默认显示 X 轴和 Y 轴方向上都有栅格。
- ◆ **Thickness of grid:** 定义栅格宽度。
- ◆ **Display grid:** 曲线下部分有填充时定义栅格的显示方式，默认为 On。

2. 列表显示

选择 Main Menu→TimeHist Postproc→List Variables 命令，弹出如图 4.58 所示的 List Time-History Variables 对话框，可以列表显示 6 个变量。

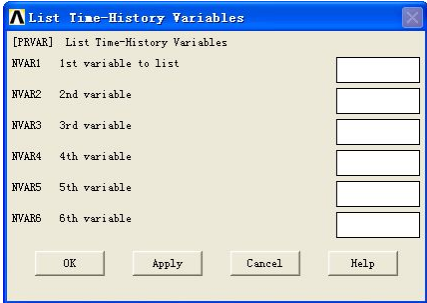


图 4.58 List Time-History Variables 对话框

选择 Main Menu→TimeHist Postpro→List Extremes 命令，弹出如图 4.59 所示的 List Extreme Values 对话框，用于列表显示一系列变量的极值，可以设置这些变量的范围（Range of variables）和增量（Increment）。

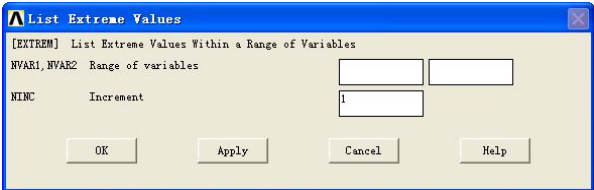


图 4.59 List Extreme Values 对话框

4.4 小结

本章介绍了 ANSYS 的两种后处理器的简单应用。

首先介绍了通用后处理器的一些应用，包括通用后处理器的图形显示、列表显示、路径操作、定义单元表、载荷工况等。分析完后首先要把结果读入到数据库中，然后进行各种需要的分析。

其次介绍了时间历程后处理器的一些应用。在时间历程后处理器中，首先需要定义与时间或频率有关的变量，然后可以对变量进行一些操作及显示。在时间历程变量观察器中进行变量的操作与在菜单中进行操作具有相同的结果。时间历程变量观察器集成了所有在后处理中要用到的方法，可以很方便地定义变量，以图形显示结果，以列表显示结果以及实现各种数学运算。

两种后处理器将在后续的章节中结合实例进行深入讲解。



第 5 章 APDL 编程语言

本章包括

- ◆ APDL 语言概述
- ◆ 参数与变量参数的用法
- ◆ 数组参数的用法
- ◆ APDL 程序结构
- ◆ APDL 宏文件

APDL 是 ANSYS Parametric Design Language 的缩写，即 ANSYS 参数化设计语言。它是 ANSYS 的高级分析技术之一，也是 ANSYS 高级应用的基础。它提供了一种逐行解释性的编程语言工具，可以很好地实现参数化的有限元分析、分析批处理、专用分析系统的二次开发以及设计优化等，是 ANSYS 不可缺少的重要技术，所有 ANSYS 使用人员都应该掌握它，丰富自己的分析手段，提高工作效率。

本章介绍了 APDL 语言的基本特性、参数变量与参数的用法、数组参数的用法、程序结构、宏文件等，并讲解了一些简单的例子。

5.1 APDL 语言概述

APDL 语言可用来完成一些通用性强的任务，也可以根据它来建立模型。APDL 语言不仅是优化设计和自适应网格划分等 ANSYS 经典特性的实现基础，也为日常分析提供了便利，运用它可以完全实现脱离菜单操作。

APDL 中的宏功能非常完善，还可以通过自定义宏实现很多菜单中无法实现的功能。使用 APDL 定义的宏，可以访问 ANSYS 图形用户界面的组件，即可以通过宏实现以下功能。

- ◆ 改变和更新 ANSYS 工具条。
- ◆ 提示用户输入某个参数的值。
- ◆ 生成对话框，提示用户输入多个参数的值。
- ◆ 通过*MSG 命令写一条输出信息。
- ◆ 允许用户在宏中通过图形拾取选择实体。
- ◆ 调用任何对话框。

除此之外，APDL 宏还支持加密功能，可以实现基于 ANSYS 的二次开发。

APDL 还包括其他许多特性，例如重复执行某条命令，实现 if-then-else 分支、do 循环，标量、

向量及矩阵操作等。一旦用户很好地掌握了这种语言，将会发现 APDL 无所不能。

5.2 参数与变量参数的用法

参数是 APDL 语言的变量（它们更像 Fortran 变量，而不像 Fortran 参数），本节介绍参数与变量参数的命名规则与使用方法。

5.2.1 参数与变量参数的命名规则

5.2.1.1 参数的基本属性

APDL 语言的变量称为参数。ANSYS 包含两种类型的参数：标量和数组，使用中并不需要明确声明参数类型。

APDL 中的所有数值变量（整形或实形）都以双精度数储存。被使用但未声明的参数变量都被赋予一个接近 0 的极小值，约为 2^{-100} 。例如，若参数 A 被定义为 $A=B$ ，但 B 没被定义，则赋给 A 一个极小值。也可以用字符串给参数变量赋值，但需要注意的是字符串不能超过 8 个字符，并且需要用单引号表明。例如， $X='NAME1'$ 。

数组参数可以是一维（一列）、二维（行和列）或三维（行、列和面）的。APDL 提供的数组参数的类型有数值、字符和表。数值是默认的数组类型。行、列和面的下标从 1 开始，为连续的整形数，数组元素为整形或实形数。该类型数组最多可有 10,242 行、255 列和 7 面。字符数组的每个元素包含不超过 8 个的文字数字字符，行、列和面的下标从 1 开始，为连续的整形数。该类型数组最多可有 10,242 行、255 列和 7 面。表是一种特殊的数值数组类型，通过它，ANSYS 可以计算在数组中明确定义的元素之间的值（通过线性插值）。而且可以为每一行、列和面定义数组下标，下标为实数（不是整形数）。数组元素可以是整数，也可以是实数。在后面的讨论中可以看到，这一特性为数学运算提供了一个非常有力的工具。该类型数组最多可有 65,535 行、255 列和 7 面。

ANSYS 中允许用参数代替数值或字符串作为 ANSYS 命令的变量，该参数被求值并被赋给命令变量。例如，把值 6.3 赋给参数 ABC，然后执行命令：

```
N,15,ABC,2
```

ANSYS 程序将把该命令解释为：

```
N,15,6.3,2 (定义节点 15 为点 X=6.3, Y=2)
```

5.2.1.2 变量参数命名规则

在为 APDL 的变量参数命名时，必须遵守以下几点规则。

- ◆ 变量参数的名称必须以字母开头，且只能包含字母、数值和下画线，名称最多 8 个字符。以下画线开头的参数名只能用于 GUI 和 ANSYS 的宏中。
- ◆ 要避免参数名与经常使用的 ANSYS 标识字相同，如：自由度（DOF）标识字（TEMP, UX, PRES 等），常用标识字（ALL, PICK, STAT 等），用户定义标识字（如用 ETABLE 命令定义的标识字），数组类型标识字（如 CHAR, ARRAY, TABLE 等）。
- ◆ 不能使用局部参数。名称为 ARG1 到 ARG9 和从 AR10 到 AR99 的参数被保留为局部参

数。局部参数通常用于宏中。

- ◆ 参数名不能与用*ABBR 命令定义的缩写相同。

下面列出一些有效和无效的参数名。

- ◆ 有效参数名:

```
CD3Y
PI
X_AND_Y
```

- ◆ 无效参数名:

```
NEW_VALUE (超过 8 个字符)
2CF3 (以数值开头)
ME1% (含非法字符 “%” )
```

5.2.2 变量参数的使用方法

本小节的内容对标量和数组类型参数都适用。只适用于数组参数的内容见 5.3 节。

5.2.2.1 定义与赋值

定义参数的方法有多种，总的来说可以分做两类：1.直接给参数赋值；2.提取 ANSYS 提供的值，再把这些值赋给参数，包括用*GET 命令或各种内嵌获取函数从 ANSYS 中提取值。下面分别进行详细说明。

常用的直接赋值方法是用*SET 命令和“=”定义参数。用“=”来调用*SET 命令更方便，其格式为：Name=Value，这里 Name 是指参数名，Value 是指赋给该参数的数值或字符。下面举例说明其用法：

```
*SET,ABC,-50.1      ABC=-50.1
*SET,PQ,2.07E11     PQ=2.07E11
*SET,XORY,ABC        XORY=ABC
*SET,CPARM,'CASE1'  CPARM='CASE1'
```

在 GUI 中，可以直接在 ANSYS 输入窗口或标量参数对话框的 Selection 域（通过 Utility Menu →Parameters→Scalar Parameters 菜单命令访问）中输入“=”。

从 ANSYS 中提取数据给参数有两种方法：使用*GET 命令，从某个特定的项目中提取数据并赋给某个特定的参数；内嵌获取函数，可在运行时使用，每个获取函数从某个特定的项目中提取特定的数据。

*GET 命令（Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data）从某个特定的项目（一个点、一个单元、一个面等）中提取 ANSYS 提供的数据并赋给某个用户命名的参数。

*GET 命令的使用格式为：

```
*GET,Par,Entity,ENTNUM,Item1,IT1NUM,Item2,IT2NUM
```

这里，Par 是将被赋值的参数名；Entity 是被提取项目的关键词，有效的关键词是 NODE, ELEM,

KP, LINE, AREA, VOLU 等, 在 ANSYS 命令参考手册 (ANSYS Commands Reference) 中的*GET 部分对其有完整的说明; ENTNUM 是实体的编号 (若为 0 则指全部实体); Item1 是指某个指定实体的项目名, 在 ANSYS 命令参考手册中的*GET 部分对每种实体的 Item1 值有完整的说明。

可用下面的例子来说明*GET 命令的用法。

```
*GET,BCD,ELEM,97,ATTR,MAT      ! BCD = 单元 97 的材料号
*GET,V37,ELEM,37,VOLU          ! V37 = 单元 37 的体积
*GET,EL52,ELEM,52,HGEN         ! EL52 = 在单元 52 生成的热值
*GET,OPER,ELEM,102,HCOE,2      ! OPER =单元 102 面 2 上的热系数
*GET,TMP,ELEM,16,TBULK,3       ! TMP = 单元 16 面 3 上的体积温度
*GET,NMAX,NODE,,NUM,MAX        ! NMAX = 最大激活节点数
*GET,HNOD,NODE,12,HGEN         ! HNOD = 在节点 12 生成的热值
*GET,COORD,ACTIVE,,CSYS       ! COORD = 激活的坐标系值
```

在某些时候, 用内嵌的获取函数来代替*GET 命令可以使程序更加简洁。获取函数返回项目的值并直接用于当前运行之中。这样就不必先把值赋给参数, 然后再在运行中调用该参数, 从而可以省去起中间作用的参数。

例如, 要计算两个节点的 X 坐标的平均值, 可以采用*GET 函数:

```
*GET,L1,NODE,1,LOC,X
*GET,L2,NODE,2,LOC,X
MID=(L1+L2)/2
```

如果知道节点坐标的获取函数 NX(N), 该函数返回节点 N 的 X 坐标值, 这样就可以不用中间参数 L1 和 L2。仅用一条命令: MID=(NX(1)+NX(2))/2 就可以实现了。

获取函数的参数可以是参数, 也可以是其他获取函数, 也就是说获取函数可以嵌套使用。例如, 获取函数 NELEM(ENUM,NPOS) 返回在单元 ENUM 上 NPOS 处的节点编号, 则联合函数 NX(NELEM(ENUM,NPOS))返回该节点的 X 坐标值。

表 5.1 总结了所有可用的获取函数。

表 5.1 获取函数总结

获取函数	提取值
实体状态	
NSEL (N)	节点 N 的状态 (-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
ESEL (E)	单元 E 的状态 (-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
KSEL (K)	关键点 K 的状态 (-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
LSEL (L)	线 L 的状态 (-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
ASEL (A)	面 A 的状态 (-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
VSEL (V)	体 V 的状态 (-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
选择下一个实体	
NDNEXT (N)	选择节点编号大于 N 的下一个节点
ELNEXT (E)	选择单元编号大于 E 的下一个单元
KPNEXT (K)	选择关键点编号大于 K 的下一个关键点

(续表)

获取函数	提取值
LSNEXT (L)	选择线编号大于 L 的下一条线
ARNEXT (A)	选择面编号大于 A 的下一个面
VLNEXT (V)	选择体编号大于 V 的下一个体
定位	
CENTRX (E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 X 坐标值
CENTRY (E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 Y 坐标值
CENTRZ (E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 Z 坐标值
NX (N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 X 坐标值
NY (N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 Y 坐标值
NZ (N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 Z 坐标值
KX (K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 X 坐标值
KY (K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 Y 坐标值
KZ (K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 Z 坐标值
LX (L, LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC (0.0 to 1.0) 处的 X 坐标值
LY (L, LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC (0.0 to 1.0) 处的 Y 坐标值
LZ (L, LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC (0.0 to 1.0) 处的 Z 坐标值
就近定位	
NODE (X, Y, Z)	距点 (X, Y, Z) 最近的被选择的节点的编号 (在当前激活坐标系中, 符合条件 的关键点中编号最小者)
KP (X, Y, Z)	距点 (X, Y, Z) 最近的被选择的关键点的编号 (在当前激活坐标系中, 符合条 件的关键点中编号最小者)
距离	
DISTND (N1, N2)	节点 N1 和节点 N2 之间的距离
DISTKP (K1, K2)	关键点 K1 和关键点 K2 之间的距离
DISTEN (E, N)	单元 E 的质心和节点 N 之间的距离。质心由单元上选择的节点确定
角度	
ANGLEN (N1, N2, N3)	两条线之间的夹角 (由 3 个节点确定, 其中 N1 为顶点)。单位默认为弧度
ANGLEK (K1, K2, K3)	两条线之间的夹角 (由 3 个关键点确定, 其中 K1 为顶点)。单位默认为弧度
离某实体最近	
NNEAR (N)	最接近节点 N 的节点
KNEAR (K)	最接近关键点 K 的关键点
ENEARN (N)	最接近节点 N 的单元。单元位置由选择的节点确定
面积	
AREAND (N1, N2, N3)	由节点 N1、N2 和 N3 围成的三角形的面积
AREAKP (K1, K2, K3)	由关键点 K1、K2 和 K3 围成的三角形的面积

(续表)

获取函数	提取值
ARNODE (N)	与节点 N 相连的被选择单元在节点 N 上分配的面积。对于二维平面实体, 返回与节点 N 相连边界的面积; 对于轴对称实体, 返回与节点 N 相连边表面的面积; 对于三维体实体, 返回与节点 N 相连面的面积
法向	
NORMNX (N1, N2, N3)	节点 N1、N2 和 N3 确定的平面的法线与 X 轴的夹角的余弦值
NORMNY (N1, N2, N3)	节点 N1、N2 和 N3 确定的平面的法线与 Y 轴的夹角的余弦值
NORMNZ (N1, N2, N3)	节点 N1、N2 和 N3 确定的平面的法线与 Z 轴的夹角的余弦值
NORMKX (K1, K2, K3)	关键点 K1、K2 和 K3 确定的平面的法线与 X 轴的夹角的余弦值
NORMKY (K1, K2, K3)	关键点 K1、K2 和 K3 确定的平面的法线与 Y 轴的夹角的余弦值
NORMKZ (K1, K2, K3)	关键点 K1、K2 和 K3 确定的平面的法线与 Z 轴的夹角的余弦值
关联	
ENEXTN (N, LOC)	与节点 N 相连的单元。若有很多单元与节点 N 相连, 则由 LOC 定位。列表结束时返回零
NELEM (E, NPOS)	单元 E 中在 NPOS (1-20) 位置上的节点号
表面	
ELADJ (E, FACE)	与单元 E 的某个表面号 (FACE) 邻近的单元。面号与面载荷关键号相同, 仅仅考虑那些有相同维数和形状的单元。若邻近的单元多于一个, 则返回-1; 若无邻近单元, 返回 0
NDFACE (E, FACE, LOC)	单元 E 的某个表面 (FACE) 上的 LOC 处的节点。面号与面载荷关键号相同。LOC 指表面上的节点位置 (对于 IJLK 表面, LOC=1 指节点 I, LOC=2 指节点 J)
NMFACE (E)	包含选定节点的单元 E 的表面号。面号输出就是面载荷关键号。如果一个面上出现多个载荷关键号 (例如线单元和面单元), 该面上的最小载荷关键号将被输出
ARFACE (E)	对于二维平面实体和三维体实体, 返回包含选定节点的单元 E 的表面面积。对于轴对称单元, 返回总表面积 (360 度)
自由度结果	
UX (N)	节点 N 在 X 向的结构位移
UY (N)	节点 N 在 Y 向的结构位移
UZ (N)	节点 N 在 Z 向的结构位移
ROTX (N)	节点 N 绕 X 向的结构转角
ROTY (N)	节点 N 绕 Y 向的结构转角
ROTZ (N)	节点 N 绕 Z 向的结构转角
TEMP (N)	节点 N 上的温度
PRES (N)	节点 N 上的压力
VX (N)	节点 N 在 X 向的流动速度

VY (N)	节点 N 在 Y 向的流动速度
(续表)	
获取函数	提取值
VZ (N)	节点 N 在 Z 向的流动速度
ENKE (N)	在节点 N 上的湍流动能 (FLOTTRAN)
ENDS (N)	在节点 N 上的湍流能量耗散 (FLOTTRAN)
VOLT (N)	节点 N 处的电压
MAG (N)	在节点 N 上的磁标势
AX (N)	在节点 N 上的 X 向磁矢势
AY (N)	在节点 N 上的 Y 向磁矢势
AZ (N)	在节点 N 上的 Z 向磁矢势

5.2.2.2 排列显示参数

定义了参数之后，就可以用*STATUS 命令把它们排列显示出来。例如，*STATUS,ABC 可以显示参数 ABC 的状态。单独的*STATUS 命令的功能是列表显示目前所有已定义的参数，需要注意的是，以下画线开头或结尾的参数不能由*STATUS 命令显示出来。ANSYS 最多允许有 1000 个参数，但是由于 GUI 和 ANSYS 宏需要用到一些参数，所以用户可设定的参数不到 1000 个。用户界面定义的参数（内部参数）数目可由*STATUS 命令列出。使用*GET,par,PARM,,MAX 命令可以得到所有已定义参数的数目。

选择 Utility Menu→List→Other→Parameters 或 UtilityMenu→List→Status→ Parameters→ All Parameters 命令也可以得到参数的列表显示。

也可以选择 Utility Menu→List→Other→Named Parameter 或 Utility Menu→List→Status→ Parameters→Named Parameters 命令指定参数的列表显示。

5.2.2.3 删除参数

删除参数的方法可以看成是一种特殊的定义与赋值，使用*SET 或者 “=” 命令，但不给参数赋值，就完成了参数的删除。

例如，删除参数 ABC 可以使用以下命令：

```
ABC=
```

或者

```
*SET,QR,
```

必须注意的是，将数值参数赋值为 0 并没有删除该参数。同样，下面两个命令也不能完成删除字符参数的功能：

```
QR=' '      !（单引号）
QR=' ' '    !（单引号中为空格）
```

5.2.2.4 数字或字符参数的置换

在有关数字命令的地方用到参数，命令中的数字使用参数的当前定义值，在该命令之后对参数定义值的修改并不会影响到这个命令的执行，也就是说，有关数字的命令会在第一时间用参数定义值置换参数。假如没有给该参数赋值（即该参数还没被定义），程序会自动赋给它一个接近 0 的值（ 2^{-100} ），通常不会发出警告。

下面的例子可以说明数字参数值的置换：

```
Y=0
X=8.4
N,1,X,Y      ! 此命令被解释为 “N,1,8.4,0”，点 1 在 (8.4, 0) 处
Y=3.5        ! 重新定义参数 Y，并不影响节点 1 的坐标
```

可以通过把参数名括在单引号中（如 ‘XYZ’）来防止参数被置换，这时被使用的是文字串，所以，这个特性仅对非数字参数有用。

相反，也可以强迫替换。把用于标题、子标题和文件名的参数名括在百分号（%）中，对其进行强迫替换。例如：

```
/TITLE, TEMPERATURE CONTOURS AT TIME=%TM%
```

在这个标题中，参数 **TM** 的数值被置换了。一旦该标题被使用，参数即被置换。强制置换在以下类型的域中有效。

- ◆ /TITLE 命令（标题域），为各种打印输出指定标题。
- ◆ /STITLE 命令（标题域），指定子标题，同/TITLE。
- ◆ /TLABEL 命令（文本域），为注释指定文本串。
- ◆ /SYP 命令（ARG1 - ARG8 域），传递命令（包括参数）到操作系统。
- ◆ *ABBR 命令（缩写域），定义缩写。
- ◆ 任何文件名或扩展名命令参数。这些参数应用到诸如/FILENAME，RESUME，/INPUT，/OUTPUT 和 FILE 等命令中（在这些域中也允许直接参数置换）。
- ◆ 任何 32 位字符域。典型的例子是目录路径，它被用于很多命令（在这些域中也允许直接参数置换）。

应用/TITLE，/STITLE，*ABBR 和/TLABEL 命令时会发生参数的动态置换。动态置换允许使用参数被修改后的值，即使使用该参数的命令还没有被调用。

例如：

```
XYZ='CASE 1'
/TITLE,This is %XYZ%
APLOT      ! 标题 “This is CASE 1” 将显示在面区域
```

若改变 XYZ 的值，那么在接下来的绘图中即使没有调用/TITLE 命令，也将显示新的标题。

```
XYZ='CASE 2'      ! 标题 “This is CASE 2” 将显示在以后的绘图中
```

5.2.2.5 字符参数的用法

字符参数通常用来提供文件名和扩展名。先把文件名赋给某个字符参数，然后，在需要用到文件名的地方用对应的参数来代替。同样，文件扩展名也可以先赋给某个字符参数，然后，在需要用到

到文件扩展名的地方用对应的参数代替。这样，在批处理模式中，只需在输入文件中简单地改变字符参数的初始值，就改变了用于多重运行的文件名。

字符参数可以作为命令的参数（此时命令参数为文字数字类型）。例如，在使用*USE 命令时作为代表宏名的参数（Utility Menu→Macro→Execute Data Block）：

```
NAME='MACRO'      ! MACRO 为某宏文件文件名
*USE,NAME          ! 调用 MACRO 宏
```

另外，在某些特定的场合，应用字符参数会带来更多的便利。

◆ *ASK

该命令用于用户给字符标量参数赋值时弹出的提示字符串（最多 8 个字符，且括在单引号中）。该命令不能由 GUI 直接得到。

◆ *CFWRITE

该命令把 ANSYS 命令写到由*CFOPEN 打开的文件中。可用于写一个分配给该文件的字符参数。例如，*CFWRITE, B= 'FILE' 是有效的。*CFWRITE 和*CFOPEN 命令不能由 GUI 直接得到。

◆ *IF 和 *ELSEIF

字符参数可用于这两个命令的 VAL1 和 VAL2 参数。对于 Oper 参数，使用字符参数时，只有 EQ（等于）和 NE（不等于）标识字是有效的。*IF 和 *ELSEIF 命令不能由 GUI 直接得到。该命令的 VAL1 到 VAL8 参数均为字符参数。数据描述符%C 用于在格式行中指明字符数据（必须接在*MSG 命令之后）。%C 与 FORTRAN 中的描述符 A8 类似。*MSG 命令不能由 GUI 直接得到。

◆ PARSAV 和 PARRES

前一个命令把字符参数保存到一个文件中（通过 PARSAV 命令或 Utility Menu→Parameters→Save Parameters 菜单命令），后一个命令从文件中恢复参数（通过 PARRES 命令或 Utility Menu→Parameters→Restore Parameters 菜单命令）。

◆ *VREAD

该命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Read from File）用于从某个文件中读取字符参数并生成一个字符数组参数。

◆ *VWRITE

该命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Write to File）用来以某种格式化的顺序把字符参数数据写到一个文件中。虽然字符参数和数字参数有很多相同的功能，但是在有些场合字符参数是无效的。

在*SET, *GET, *DIM 和*STATUS 命令中，Par 参数对应的字符参数是不能被置换的。

对于字符数组参数，不能应用交互式编辑方式（*VEDIT 命令）。

向量运算命令，如*VOPER, *VSCFUN, *VFUN, *VFILL, *VGET 和*VITRP，不能用于字符数组参数。

对字符参数进行运算时，*VMASK 和*VLEN 命令只能应用于*VWRITE 和 *VREAD 命令中。

字符参数不能用于包括加、减、乘等运算的参数公式中。

5.2.2.6 参数公式

参数公式包括对参数和数值的运算，如加、减、乘、除等。例如：

```
X=A+B
P=(QR1+QR2)/2
D=-B+(E**2)-(4*A*C)
XY=(A<B)+2*QR      ! 如果 A 小于 B, XY=A+2QR; 否则 XY = B + 2QR
```

表 5.2 是 APDL 运算符号的列表。


表 5.2 APDL 运算符号列表

运算符号	操作
+	加
-	减
*	乘
/	除
**	求幂
<	小于
→	大于

也可以如上例一样使用圆括号。ANSYS 运算的优先顺序如下所示。

- ◆ 圆括号中的运算（最里面最优先）。
- ◆ 求幂（从右到左）。
- ◆ 乘和除（从左到右）。
- ◆ 一元联合（例如 +A 或-A）。
- ◆ 加和减（从左到右）。
- ◆ 逻辑判断（从左到右）。

因此，一个形如 $Y2=A+B**C/D*E$ 的公式将按如下顺序求值：先求 $B**C$ ，第二步 $/D$ ，第三步 $*E$ ，最后 $+A$ 。为了更清楚，可以在公式中使用圆括号。圆括号最多可嵌套 4 层，在每套圆括号中最多可有 9 次运算。

需要特别注意的是，在公式的运算符之间不要有空格，特别是在*之前不能有空格，因为如果有空格，接下来的输入行（以*开头）将被作为一条命令来解释，而不再是公式的一部分。

5.2.2.7 带参数的函数

一个带参数的函数是数学运算的程序序列，并返回一个值，例如 $SIN(X)$ 、 $SQRT(B)$ 和 $LOG(13.2)$ 。表 5.3 列出了当前可用的 ANSYS 函数。



表 5.3 ANSYS 函数

函数名	含义
ABS(x)	x 的绝对值
SIGN(x, y)	x 的绝对值，但取 y（正负）符号。y=0 时结果取正号
EXP(x)	x 的指数值
LOG(x)	x 的自然对数值(ln (x))
LOG10(x)	x 的常用对数值(log10(x))
SQRT(x)	x 的平方根值
NINT(x)	x 的整数部分
MOD(x, y)	x/y 的余数部分。若 y=0，则返回 0
RAND(x, y)	在 x 到 y 范围内产生随机数（一致分布）(x 为下限，y 为上限)
GDIS(x, y)	生成平均值为 x 且偏差为 y 的正态分布的随机数
SIN(x), COS(x), TAN(x)	x 的正弦、余弦及正切值。x 的默认单位为弧度，但可用*AFUN 命令将其转化为度数
SINH(x), COSH(x), TANH(x)	x 的双曲线正弦、余弦及正切值
ASIN(x), ACOS(x), ATAN(x)	x 的反正弦、反余弦及反正切值。对于 ASIN 和 ACOS，x 必须在-1.0 和 +1.0 之间。输出的默认单位为弧度，但可用*AFUN 命令将其转化为度数。对于 ASIN 和 ATAN，输出值的范围在-pi/2 到+pi/2 之间；对于 ACOS，输出值的范围在 0 到 pi 之间
ATAN2(y, x)	y/x 的反正切值。输出的默认单位为弧度，但可用*AFUN 命令将其转化为度数。输出值的范围在-pi 到+pi 之间
VALCHR(CPARM)	返回 CPARM 的数字值（如果 CPARM 是一个数值则返回 0.0）
CHRVAL(PARM)	数字参数 PARM 的字符值。小数点位置取决于数值大小
UPCASE(CPARM)	把 CPARM 转化为大写
LWCASE(CPARM)	把 CPARM 转化为小写

下面是一些带参数函数的例子：

```
PI=ACOS(-1)           ! PI = -1 的反余弦值，PI 的精确度由机器确定
Z3=COS(2*THETA)-Z1**2
R2=SQRT(ABS(R1-3))
X=RAND(-24,R2)         ! X = (-24 和 R2 之间的随机值)
*AFUN,DEG              ! 把角度的单位转换为度数
THETA=ATAN(SQRT(3))    ! THETA 等于 60 度
PHI=ATAN2(-SQRT(3),-1) ! PHI 等于-120 度
*AFUN,RAD              ! 把角度的单位转换为弧度
X249=NX(249)           ! 节点 249 的 X 轴坐标
SLOPE=(KY(2)-KY(1))/(KX(2)-KX(1))
                        ! 连接关键点 1 和 2 的线的斜率
CHNUM=CHRVAL(X)        ! CHNUM = X 的字符值
UPPER=UPCASE(LABEL)    ! UPPER = 参数 LABEL 的大写字符
```

5.2.2.8 参数的保存和恢复

参数可以存储到指定文件当中，也可以从文件中恢复。读取文件时，可以全部代替当前定义的



参数，也可以只把它们加到当前定义的参数中。注意，这会覆盖当前 ANSYS 中的同名参数变量。参数的保存与恢复的主要目的是在多个任务之间传递参数，或者保留当前工作内容的参数设置。

可用 **PARSAV** 命令把参数写入一个文件中（Utility Menu→Parameters→Save Parameters）。**PARSAV** 命令存储变量的格式如下：

```
PARSAV, lab, 文件名, 扩展名
```

其中，若 **lab** 项填写 **SCALAR**，则命令只存储变量，不存储数组或表；填入 **ALL**，则存储所有参数，包括数组和表。

得到的参数文件是 **ASCII** 文件，主要由 **APDL *SET** 命令组成，该命令用来定义各种参数。用下面的例子来说明参数文件的格式。

```
/NOPR
*SET,A,10.000000000000
*SET,B, 14.5241750000
*SET,C,'GOOD'
*SET,RETURN,0.000000000000E+00
*SET,STATUS,1.000000000000
/GO
```

可用 **PARRES** 命令从一个文件中读取参数（Utility Menu→Parameters→Restore Parameters）。**PARRES** 命令的格式如下：

```
PARRES, lab, 文件名, 扩展名
```

其中，**lab** 项填 **NEW** 表示恢复的参数将覆盖程序内存中的变量，填 **CHANGE** 表示恢复的参数将以合并方式增加到程序内存中。

5.3 数组参数的用法

在 5.2 节中讲解的参数的各种用法对数值参数和数组参数均适用，本节仅对数组参数特有的一些用法和性质进行讲解。

5.3.1 数组参数概述

一个数值参数只能存储一个参数值，而数组参数可以按照行、列、面结构存储多个参数值。在 ANSYS 中，一维数组只有一列数据结构，即一个列矢量，可以直接用于矢量运算；二维数组由行、列组成，每一列相当于一个矢量，可以看成由多个一维数组所构成；三维数组由行、列、面构成，每个面相当于一个二维数组。

ANSYS 提供了 3 种数组类型，**ARRAY**、**CHAR** 和 **TABLE**。

ARRAY 这种类型与 **FORTRAN 77** 的数组类似，是默认的数组类型。行、列和面的下标从 1 开始，为连续的整数数，数组元素为整形或实形数。**ARRAY** 数组最多可以容纳 10242 行、255 列和 7 面。

CHAR 是字符数组，行、列和面的下标从 1 开始，为连续的整数数，每个元素包含不超过 8 个

的文字数字字符。**CHAR** 数组最多可以容纳 10242 行、255 列和 7 面。

TABLE 是一种特殊的数字数组类型，通过它，**ANSYS** 可以计算在数组中明确定义的元素之间的值（通过线性插值），还可以为每一行、列和面定义实数下标。数组元素可以是整数，也可以是实数。在后面的讨论中可以看到，这一特性为数学运算提供了一个非常有力的工具。**TABLE** 数组最大可以容纳 65535 行、255 列和 7 面。

ARRAY 数组和 **CHAR** 数组的设置较为简单，**TABLE** 数组的设置比较复杂。下面详细讲解 **TABLE** 数组的特点。一个 **TABLE** 数组参数由安放在表格形式中的数（文字数字无效）组成，与 **ARRAY** 类型较为相似。但是，它们之间有以下 3 点主要区别。

- ◆ **ANSYS** 能计算在 **TABLE** 数组中明确定义的元素之间的任意值（通过线性插值）。
- ◆ **TABLE** 数组包含 0 行 0 列，与一般数组不同，其下标值可以是实数。唯一的限制是下标值必须是增加的（不能减少）数值。必须通过行和列的下标值来明确声明某个值，否则，将被赋一个“极小值”（7.888609052E-31）。
- ◆ 面的下标值放在该面的（0,0）处。

图 5.1 用来说明一个 **TABLE** 数组。该图显示了一个可以进行数值检索的表数组。

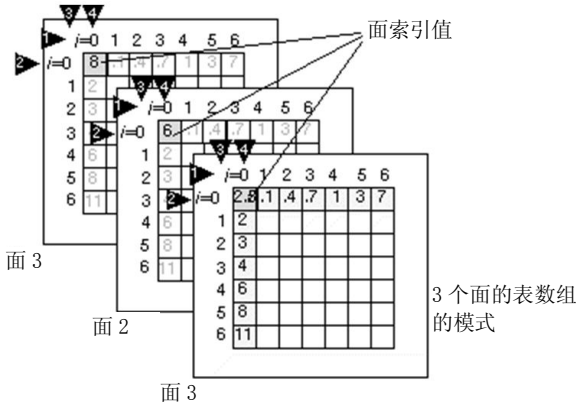


图 5.1 TABLE 数组

如图 5.1 所示，初始化一个表数组时，必须设置以下几项。

- ◆ 每个面的（0,0）元素值为该面的下标值。
- ◆ 面 1 中 0 行里的列下标值。只有想从数组中得到数据时才会用到这些值。给数组中的元素赋值时，采用传统的行列下标即可。
- ◆ 面 1 中 0 列里的行下标值。同样的，只有想从数组中得到数据时才会用到这些值。给数组中的元素赋值时，采用传统的行列下标即可。
- ◆ 任何面中都可以设置或改变行列的下标值，这些下标值将应用在所有面中。

5.3.2 数组参数的定义

定义一个数组参数，必须通过 ***DIM** 命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/ Edit）来声明其类型和维数。

下面举例说明如何使用 ***DIM** 命令。

*DIM, ABC, , 12

! 类型 ARRAY 为默认类型，维数为 12 [×1×1]

```
*DIM,XYZ,ARRAY,12,4,2      !ARRAY 类型数组, 维数为 12×4×2
*DIM,VOLUME,TABLE,3        !TTABLE 类型数组, 维数为 3[×1×1]
*DIM,CPARR1,CHAR,5          !CHAR 类型数组, 维数为 5[×1×1]
*DIM,T1,,4,3                !维数为 4×3[×1]
```

与数值数组不同的是, 定义 **ARRAY** 和 **TABLE** 类型的数组元素被初始化为 **0**, **CHAR** 类型的数组元素被初始化为一个空格。需要特别注意的是 **TABLE** 类型的 **0** 行和 **0** 列, 它们被初始化为“极小值”。



CHAR 不能作为一个字符参数名, 因为在 ***DIM** 命令中它会和 **CHAR** 标识字发生冲突。当 **CHAR** 被用于 ***DIM** 命令中的第 3 个参数时, **ANSYS** 将替换赋给参数 **CHAR** 的字符串。

5.3.3 数组参数的赋值

可以通过以下途径为数组元素赋值。

- ◆ 通过 ***SET** 命令或 “=” 给单独的数组元素赋值。
- ◆ 用指定的或计算出的值来填充数组中的某个向量 (列) (如 ***VFILL** 命令)。
- ◆ 通过 ***VEDIT** 对话框交互地给元素赋值。
- ◆ 从某个 **ASCII** 文件中读取值 (***VREAD** 或 ***TREAD** 命令)。

5.3.3.1 直接给各数组赋值

用 ***SET** 命令或 “=” 给元素赋值的方式完成数组赋值。由于每个 “=” 命令最多可定义 **10** 个数组元素值, 因此定义一个维数为 **12x1** 的数组参数 **XYZ**, 就需要使用两次 “=” 命令。其余和在数值参数中的用法相同。例如, 在下面的例子中, 第一条命令定义了 **8** 个数组元素, 第二条命令定义了剩下的 **4** 个数组元素。

```
ABC(1)=23.1,10.662,-9.01,-9.9,-1.37,9.52,-30.6,65
ABC(9)=-19.1,4.46,18.9,-10.8
```

$$ABC = \left\{ \begin{matrix} 23.1 \\ 10.662 \\ -9.01 \\ -9.9 \\ -1.37 \\ 9.52 \\ -30.6 \\ 65 \\ -19.1 \\ 4.46 \\ 18.9 \\ -10.8 \end{matrix} \right\}$$

下面的例子说明了如何定义维数为 **4x3** 的数组参数 **T2** 的元素值，**T2** 在前面已经由***DIM** 定义：

```
T2(1,1)=1.2,4.5,-0.9,7.0      ! 定义(1,1),(2,1),(3,1),(4,1)
T2(1,2)=5.0,-6.5,9.1,55.3     ! 定义(1,2),(2,2),(3,2),(4,2)
T2(1,3)=2E-4,-2.0,13.5,.01    ! 定义(1,3),(2,3),(3,3),(4,3)
```

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1.2 & 5.0 & 0.0002 \\ 4.5 & -6.5 & -2.0 \\ -0.9 & 9.1 & 13.5 \\ 7.0 & 55.3 & 0.01 \end{bmatrix}$$

下面的例子定义 **TABLE** 类型的参数 **VOLUME** 的元素值，**VOLUME** 前面已定义过。

```
VOLUME (1)=0,560,238.5
VOLUME (1,0)=1E-6,.8,9.3
```

$$VOLUME = \begin{matrix} & 1E-6 & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 560 \\ 238.5 \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} 0.8 \\ 9.3 \end{matrix} & \end{matrix}$$

字符数组参数也能用“=”命令来定义。每个值最多可有 **8** 个字符，且必须括在单引号中。
例如：

```
CPARR1 (1)='SA','SB','SC','SD','SE'      !给参数 CPARR1 赋值
```

注意到，当定义一个数字数组参数时，要给出数组元素的起始位置（本例中，指定了行下标值 **1**）。

5.3.3.2 填充数组矢量

可以使用***VFILL** 命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Fill）来“填充” 一个 **ARRAY** 或 **TABLE** 向量（列）。

***VFILL** 命令的使用格式如下：


```
*VFILL,parR,func,CON1,CON2, CON3,CON4, CON5,CON6, CON7,CON8, CON9,CON10
```

其中，**parR** 是参数列矢量名称，对于二维或三维数组而言，代表其中的某列矢量。**func** 是填充数据服从的函数规律。函数规律介绍如下。

- ◆ **DATA**: 将制定的 **CON1-CON10** 数值填充到列矢量中。
- ◆ **RAMP**: 按 **CON1+ ((n-1) *CON2)** 规律进行列矢量填充。
- ◆ **RAND**: 以基于均匀分布的随机数填充列矢量。**CON1** 为随机数下限（默认为 **0.0**），**CON2** 为随机数上限（默认为 **1.0**）。
- ◆ **GDIS**: 以基于高斯分布的随机数填充列矢量。**CON1** 为均值（默认为 **0.0**），**CON2** 为标准方差（默认为 **1.0**）。
- ◆ **TRIA**: 以基于三角分布的随机数填充列矢量。**CON1** 为随机数下限（默认为 **0.0**），**CON3** 为峰值位置，**CON2** 为随机数上限。
- ◆ **BETA**: 以基于 **BETA** 分布的随机数填充列矢量。**CON1** 为随机数下限（默认为 **0.0**），**CON2** 为随机数上限，**CON3** 与 **CON4** 代表 **alpha** 和 **beta** 参数值且必须为正数（默认为 **1.0**）。
- ◆ **GAMM**: 以基于 **GAMMA** 分布的随机数填充列矢量。**CON1** 为随机数下限（默认为 **0.0**），**CON2** 与 **CON3** 代表 **alpha** 和 **beta** 参数值且必须为正数（默认为 **1.0**）。

下面的例子说明了***VFILL** 命令的用途。

```
*DIM,TAB,ARRAY,3,3      ! 定义维数为 3×3 的数字数组
*VFILL,TAB(1,1),DATA,-1.8,16,-0.6  ! 4 个数值被赋给向量 1
*VFILL,TAB(1,2),RAMP,2.6,1.1      ! 用起始值为 2.6，增量为 1.1 的数来填充向量 2
*VFILL,TAB(1,3),RAND,1.5,10      ! 用 1.5 和 10 之间的随机数来填充向量 3
```

$$TAB = \begin{bmatrix} -1.8 & 2.6 & 2.33152468 \\ 16 & 3.7 & 6.52135462 \\ -0.6 & 4.8 & 8.54864659 \end{bmatrix}$$

5.3.3.3 交互式编辑数组

交互式编辑数组是利用***VEDIT** 命令（**Utility Menu**→**Parameters**→**Array Parameters**→**Define/Edit**）完成的，该命令会弹出一个数据输入对话框，通过该对话框可以编辑一个 **ARRAY** 或 **TABLE** 数组，但是不能编辑 **CHAR** 数组。**ARRAY** 数组和 **TABLE** 数组的***VEDIT** 对话框例子分别如图 5.2 和图 5.3 所示。该对话框提供了以下一些便利特性。

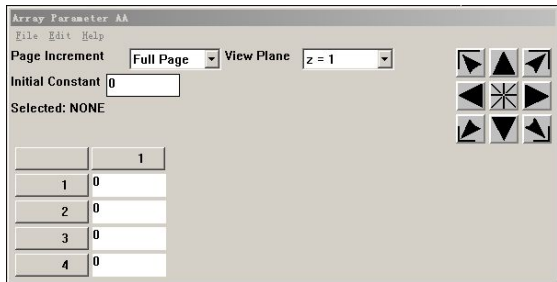


图 5.2 ARRAY 数组的***VEDIT** 对话框例子

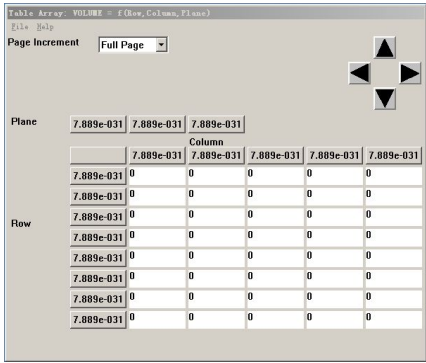


图 5.3 TABLE 数组的*VEDIT 对话框例子

- ◆ 为数组元素值提供一个电子数据表格形式的编辑器。
- ◆ 为大数组提供导向控制，可以控制导向方向、数组面的选择及数组元素的展示范围。
- ◆ 初始化某一行或列的功能（仅对 **ARRAY** 有效）。
- ◆ 对行或列的数据进行删除、复制和插入功能（仅对 **ARRAY** 有效）。
- ◆ 单击对话框中的 **Help** 按钮，可以得到该对话框的全部用法说明。

5.3.3.4 用数据文件赋值数组

使用 ***VREAD** 命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Read from File）可用数据文件填充 **ARRAY** 数组。使用 ***TREAD** 命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Read from File）可用数据文件填充 **TABLE** 数组。该命令从一个 **ASCII** 数据文件中读取信息，并由指定下标处开始写入数组中。

对 **ARRAY** 数组，可以通过数据描述符来控制从文件中读取的信息的格式。数据描述符必须括在圆括号中，并放在 ***VREAD** 命令之后。数据描述符控制从每个记录中读取的数据数目、数据宽度和数据中小数点的位置。

例如，有下面的数据文件：

```
1.5      7.8    12.3
15.6    -45.6   42.5
```

和一个维数为 **3 x 2** 的数组 **EX**，执行下面的命令（宏或输入命令的一部分）：

```
*VREAD,EX (1,1),,,2
(3F6.1)
```

结果为

$$EX = \begin{bmatrix} 1.5 & 15.6 \\ 7.8 & -45.6 \\ 12.3 & 42.5 \end{bmatrix}$$



注意

不能直接在输入窗口中执行 ***VREAD** 命令。但是，选择 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Read from File 命令，在弹出的对话框中可以指定数据描述符并交互式执行该命令。



对 **TABLE** 数组，如果要从一个外部文件的数据表中读取数据，首先仍然要定义 **TABLE** 数组，指定行、列和面的数目及标识字，然后通过 ***TREAD** 命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Read from File）读取包含数据表的 **ASCII** 文件。同时，还要指定在文件开头和数据表的第一行之间需跳过的行数（**NSKIP**）。

执行此操作时，需要注意以下几点。

- ◆ 包含数据表的 **ASCII** 文件可以由文本编辑器或外部应用程序（如 **Microsoft Excel**）生成，但必须是 **ASCII** 形式，且由制表符分界。
- ◆ 首先必须在 **ANSYS** 中定义数组，记住允许下标值为(0,0)。
- ◆ 按行读入数值，直到数组中每行的所有列都已填充完；然后，**ANSYS** 一行行地轮流填充它们包含的列。一定要保证所定义的数组有正确的维数。如果在 **ANSYS** 中错误地定义了一个少于要求列数的数组，**ANSYS** 将从数据表读入的第一行剩下的数据开始填充数组的下一行。类似的，如果在 **ANSYS** 中错误地定义了一个多于要求列数的数组，**ANSYS** 将从数据表另一行读入的数值填充数组的所有列，仅当换到下一行时才开始填充下一行。

可以从外部文件中读取数据来生成一维、二维、三维 **TABLE** 数组。下面举例说明如何生成。

例 1：一维 **TABLE** 数组。

首先，用选择的应用程序（如电子制表软件、文本编辑器等）生成一维表，并将其保存为带制表符的文本文件。本例中，表名为“**Tdata**”，包含时间和温度的对应数据，如表 5.4 所示。

表 5.4 时间温度表

Time	Temp
0	20
1	30
2	70
4	75

在 **ANSYS** 中，用 ***DIM** 命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit）定义一个表数组参数“**Tt**”。指定其维数为 4 行 1 列，行标识字为 **Time**（时间），列标识字为 **Temp**（温度）。注意，生成的数据表的数据为 4 行 1 列（第一列 **TIME** 是行的下标值）。然后如上所述读取该文件，指定跳过两行。该 **TABLE** 数组在 **ANSYS** 中将如图 5.4 所示。

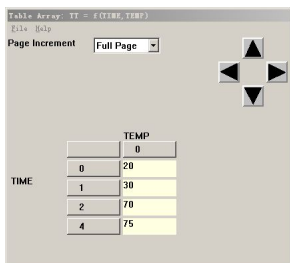


图 5.4 用一维表文件为数组赋值

同样的例子也可通过下面的命令实现：

```
*DIM,Tt,table,4,1,1,TIME,TEMP
*TREAD,Tt,tdata,txt,,2
```

例 2：二维 TABLE 数组。

对于这个例子，先生成一个二维 TABLE 数组“T2data”（用电子制表软件、文本编辑器等），其中包含作为时间函数的温度数据和 X 坐标值，然后将其读入一个名为“Ttx”的表数组参数中。该表以 ASCII 形式表示，如表 5.5 所示。

表 5.5 温度（时间-X 坐标）表

Time	X-Coordinate				
0	0	.3	.5	.7	.9
0	10	15	20	25	30
1	15	20	25	35	40
2	20	25	35	55	60
4	30	40	70	90	100

在 ANSYS 中，用*DIM 命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit）定义一个表参数“Ttx”。指定其维数为 4 行 5 列，行标识字为 TIME，列标识字为 X-COORD。注意，生成的数据表的数据为 4 行 5 列，再加上行和列的下标值。然后如上所述读取该文件，指定跳过两行。该表数组在 ANSYS 中将如图 5.5 所示。

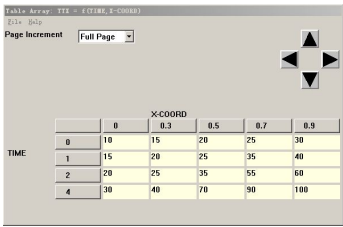


图 5.5 用二维表文件为数组赋值

同一个例子也可通过下面的命令实现：

```
*DIM,Ttx,table,4,5,,time,X-COORD
*TREAD,Ttx,t2data,txt,,2
```

例 3：三维 TABLE 数组。

对于这个例子，先生成一个三维 TABLE 数组“T3data”（用电子制表软件、文本编辑器等），其中包含作为时间函数的温度数据、X 坐标值和 Y 坐标值，然后将其读入一个名为“Ttxy”的表数组参数中。该表以 ASCII 形式表示，如表 5.6 所示。

表 5.6 温度（时间-X 坐标）表

Time	X-Coordinate				
0	0	.3	.5	.7	.9
0	10	15	20	25	30
1	15	20	25	35	40
2	20	25	35	55	60
4	30	40	70	90	100

(续表)

Time	X-Coordinate				
1.5	0	.3	.5	.7	.9
0	20	25	30	35	40
1	25	30	35	45	50
2	30	35	45	65	70
4	40	50	80	100	120

在上面的例子中，粗体字的值表示各个面。每面中，行列的下标值都是一样的，只是面的下标值及实际的数据值不同。上表中带底纹的数据显示了面与面之间改变的的实际的数据值。

在 ANSYS 中，通过*DIM 命令（Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit）定义一个表数组参数“Ttxy”。在 3-D 表数组中，数组的维数由行、列和数据面的数目确定。第一列（TIME）是行的下标值，第一行是列的下标值。指定维数为 4 行、5 列、2 个面，行标识字为 TIME，列标识字为 X-COORD，面标识字为 Y-COORD。注意，生成的数据表的数据为 4 行 5 列 2 面，每面再加上行和列的下标值。然后如前所述读取该文件，指定跳过两行。对于第二个数据面（Y=1.5），该 TABLE 数组在 ANSYS 中将如图 5.6 所示。

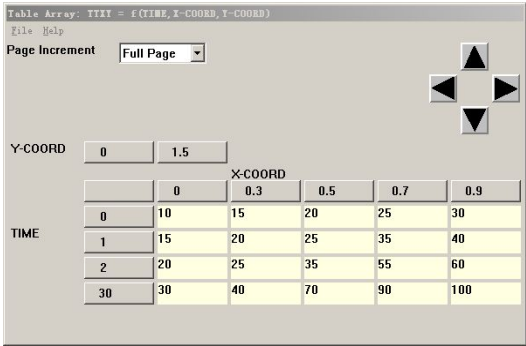


图 5.6 用三维表文件为数组赋值

同一个例子也可通过下面的命令实现：

```
*DIM,Ttxy,table,4,5,2,TIME,X-COORD,Y-COORD
*TREAD,Ttxy,t3data,txt,,2
```

5.3.4 数组参数的运算

5.3.4.1 TABLE 数组的插值

插值是 TABLE 数组的独特功能，访问 TABLE 数组时，ANSYS 可在已定义的值之间进行插值。下面的例子说明 ANSYS 如何在 TABLE 数组中进行插值：

$$A = \begin{matrix} & 1.0 & 2.0 \\ \begin{matrix} 1.0 \\ 2.0 \\ 3.0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 10 \\ 20 \\ 100 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$B = \begin{matrix} & 1.0 & 2.0 \\ \begin{matrix} 1.0 \\ 2.0 \\ 3.0 \\ 4.0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2.8 & 4.2 \\ -9.6 & -12.3 \\ 42.0 & 9.7 \\ -4.5 & 2.0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

给定 **A** 为 **TABLE** 数组参数，**ANSYS** 程序能计算 **A(1)**和**A(2)**之间的任意值，如：

```
A(1.5) 等于 15.0 (10.0 和 20.0 的中值)
A(1.75) 等于 17.5
A(1.9) 等于 19.0
```

同样，如果 **B** 是一个 **TABLE** 数组参数，则

```
B(1.5,1) 等于 -3.4 (2.8 和 -9.6 的中值)
B(1,1.5) 等于 3.5 (2.8 和 4.2 的中值)
B(3.5,1.3) 等于 14.88
```

因此可以利用该功能，使用 **TABLE** 数组参数来描述函数 **y=f(x)**：用 **j=0** 列作为自变量 **x** 的值，用 **j=1** 列作为 **y** 的值。

指定函数为一个 **TABLE** 数组参数，其数组元素为力的值，从 1 到 5 的行下标值是时间值 0.0 到 9.3。该参数可表示如下：

$$\text{VOLUME} =$$

	0
$1\text{E}-6$	0
0.8	560
9.3	238.5

ANSYS 能计算出（通过线性插值）在 **VOLUME** 参数中没有定义的时间处的力值。在上面的例子中，**ANSYS** 可以计算出 **FORCE(9)**的值为 **249.8470588235294**。如果参数位置超过了数组的维数，那么该参数的值为最后的参数值，并不采用外推法。例如，**ANSYS** 给 **VOLUME(12)**赋值 **0.0**。

从这些例子中可以看出，**TABLE** 数组参数在分析中是非常有用的。其典型应用有时间历程载荷函数、响应谱曲线、压力曲线、材料-温度曲线、磁性材料的 **B-H** 曲线等。运行时，**TABLE** 数组参数比 **ARRAY** 类型参数需要更多的机时。

5.3.4.2

对矢量的运算

同参数表达式和函数允许对标量参数进行运算一样，也有一系列的命令可以对数组参数进行运算。这种运算可分为两类：矢量运算和矩阵运算。所有的运算都受到一套 **ANSYS** 规定命令的影响。

对矢量的运算就是按一定规则对数组元素进行一系列的诸如加、减、求正弦、求余弦、点积、叉乘等运算。也可以用 **Do** 循环语句来达到这一目的，但是采用矢量操作命令***VOPER**、***VFUN**、***VSCFUN**、***VITRP**、***VFILL**、***VREAD** 和**VGET** 更为简便快捷。***VREAD** 和**VWRITE** 对 **CHAR** 数组有效，其余的只能用于 **ARRAY** 数组或 **TABLE** 数组。

VFILL**、VREAD**、***VGET**、***VWRITE** 和***DIM** 命令已经介绍过了，下面讲解其他几个命令。

```
*VOPER (Utility Menu→Parameters→Array Operations→Vector Operations)
```

功能：对两个输入数组矢量进行运算，输出一个数组向量。

命令格式：***VOPER,ParR,Par1,Oper,Par2,CON1,CON2**

其中，**ParR** 是运算结果数组矢量名；**Par1** 是第一个数组参数矢量，也可以是一个标量或者一个常数；**Oper** 是矢量运算法则。矢量运算法则介绍如下。

- ◆ ADD: 加法运算 $\text{Par1} + \text{Par2}$ 。
- ◆ SUB: 减法运算 $\text{Par1} - \text{Par2}$ 。
- ◆ MULT: 乘法运算 $\text{Par1} * \text{Par2}$ 。
- ◆ DIV: 除法运算 $\text{Par1} / \text{Par2}$ (被 0 除的结果是 0)。
- ◆ MIN: 最小值运算, 取 Par1 与 Par2 的最小值。
- ◆ MAX: 最大值运算, 取 Par1 与 Par2 的最大值。
- ◆ LT: 小于比较运算 $\text{Par1} < \text{Par2}$, 如果成立, 结果为 1, 否则为 0。
- ◆ LE: 小于等于比较运算 $\text{Par1} \leq \text{Par2}$, 如果成立, 结果为 1, 否则为 0。
- ◆ EQ: 等于比较运算 $\text{Par1} = \text{Par2}$, 如果成立, 结果为 1, 否则为 0。
- ◆ NE: 不等于比较运算 $\text{Par1} \neq \text{Par2}$, 如果成立, 结果为 1, 否则为 0。
- ◆ GE: 大于等于比较运算 $\text{Par1} \geq \text{Par2}$, 如果成立, 结果为 1, 否则为 0。
- ◆ GT: 大于比较运算 $\text{Par1} > \text{Par2}$, 如果成立, 结果为 1, 否则为 0。
- ◆ DER1: 微分运算 $\partial(\text{Par1}) / \partial(\text{Par2})$ 。
- ◆ DER2: 二阶微分运算 $\partial^2(\text{Par1}) / \partial(\text{Par2})^2$ 。
- ◆ INT1: 积分运算 $\int (\text{Par1}) d(\text{Par2})$ 。
- ◆ INT2: 二阶积分运算 $\iint (\text{Par1}) d(\text{Par2})$ 。
- ◆ DOT: 点乘运算 $\text{Par1} \cdot \text{Par2}$ 。
- ◆ CROSS: 叉乘运算 $\text{Par1} \times \text{Par2}$ 。
- ◆ GATH: 集聚运算 (根据元素位置编号记录矢量 Par2 , 将矢量 Par1 中对应位置上的值复制到矢量 ParR 中。例如 $\text{Par1} = (2, 4, 6, 8)$, $\text{Par2} = (1, 4, 2)$, 则运算结果是 $\text{ParR} = (2, 8, 4)$)。
- ◆ SCAT: 发散运算, 是 GATH 的逆运算 (矢量 Par2 的元素值依次记录 ParR 中每个元素来源于矢量 Par1 中的元素位置, 运算依次按 Par2 指定的位置编号将矢量 Par1 中的元素复制到矢量 ParR 中)。

*VFUN (Utility Menu→Parameters→Array Operations→Vector Functions)

功能: 对两个输入数组矢量执行某函数, 输出一个数组向量。

命令格式: *VFUN, ParR, Func, Par1, CON1, CON2, CON3

其中, ParR 是运算结果数组矢量名, Func 是执行的矢量运算函数。矢量运算函数介绍如下。

- ◆ ACOS: 反余弦函数 $\text{ACOS}(\text{Par1})$ 。
- ◆ ASIN: 反正弦函数 $\text{ASIN}(\text{Par1})$ 。
- ◆ ASORT: 按照升序排列 Par1 。
- ◆ DSort: 按照降序排列 Par1 。
- ◆ ATAN: 反正切函数 $\text{ATAN}(\text{Par1})$ 。
- ◆ COMP: 压缩函数, 即有选择地压缩数据序列。
- ◆ COPY: 复制函数, 即将 Par1 复制到 ParR 。
- ◆ COS: 余弦函数 $\text{COS}(\text{Par1})$ 。

- ◆ COSH: 双曲余弦函数 COSH(Par1)。
- ◆ DIRCOS: 主应力 (nX9) 的方向余弦函数。
- ◆ EULER: 主应力 (nX3) 的 Euler 角函数。
- ◆ EXP: 指数函数 EXP(Par1)。
- ◆ EXPA: 展开函数, 即压缩函数 COMP 的逆运算函数。
- ◆ LOG: 自然对数函数 LOG(Par1)。
- ◆ LOG10: 常用对数函数 LOG10(Par1)。
- ◆ NINT: 最接近的整数函数, 即四舍五入取整数。
- ◆ NOT: 逻辑补函数, 即如果值小于等于 0.0 (false) 则运算结果是 1.0 (true), 如果值大于等于 0.0 (true) 则运算结果是 0.0 (false)。
- ◆ PWR: 幂函数 Par1**CON1。
- ◆ SIN: 正弦函数 SIN(Par1)。
- ◆ SINH: 双曲正弦函数 SINH(Par1)。
- ◆ SQRT: 开方根函数 SQRT(Par1)。
- ◆ TAN: 正切函数 TAN(Par1)。
- ◆ TANH: 双曲正切函数 TANH(Par1)。
- ◆ TANG: 路径一点上的切向函数。
- ◆ NORM: 路径一点上的法向函数。
- ◆ LOCAL: 将一点的总体坐标转换成指定局部坐标系中的局部坐标。
- ◆ GLOBAL: 将一点在指定局部坐标系中的坐标转换成总体坐标系中的坐标。

*VSCFUN (Utility Menu→Parameters→Array Operations→Vector-Scalar Func)

功能: 确定单个输入数组的矢量属性, 并将结果存放到指定的标量参数中。

命令格式: *VFUN,ParR,Func,Par1

其中, ParR 是运算结果数组矢量名, Func 是执行的矢量变量运算函数。矢量变量运算函数介绍如下。

- ◆ MAX: 提取最大元素值函数, 即提取 Par1 的最大元素值。
- ◆ MIN: 提取最小元素值函数, 即提取 Par1 的最小元素值。
- ◆ LMAX: 提取最大元素的下标值函数, 从指定下标开始搜索 Par1 的元素。
- ◆ LMIN: 提取最小元素的下标值函数, 从指定下标开始搜索 Par1 的元素。
- ◆ FIRST: 提取 Par1 的第一个非零元素的下标值函数, 从指定的下标开始搜索 Par1 的元素。
- ◆ LAST: 提取 Par1 的最后一个非零元素的下标值函数, 从指定的下标开始搜索 Par1 的元素。
- ◆ SUM: 求和函数, 对 Par1 的所有元素进行求和。
- ◆ MEDI: 提取中间位置的元素值函数, 该元素的前后有相同数目的元素。
- ◆ MEAN: 求平均值函数, 即对 Par1 的所有元素进行求和, 然后除以 Par1 元素的总数目。
- ◆ VARI: 求均方差函数, 即用所有元素与均值差的平方和除以 Par1 元素的总数目。
- ◆ STDV: 求标准方差, 即求 VARI 的平方根值。
- ◆ RMS: 求均方根, 即用所有元素的平方和除以 Par1 元素的总数目。
- ◆ NUM: 提取数目, 即提取 Par1 中执行求和运算的元素数目 (表明掩码即 mask 的元素不计入)。

*VITRP (Utility Menu→Parameters→Array Operations→Vector Interpolate)

功能：通过在指定的表下标位置插入一个 TABLE 数组参数来生成一个 ARRAY 数组参数。

命令格式：*VITRP,ParR,ParT,ParI,ParJ,ParK

其中，ParR 是运算结果数组矢量名，ParT 是 TABLE 数组参数名，ParI 是 ParT 中用于插值的 I 行下标值的数组参数矢量，ParJ 是 ParT（至少是二维数组）中用于插值的 J 列下标值的数组参数矢量，ParK 是 ParT（至少是三维数组）中用于插值的 K 面下标值的数组参数矢量。

5.3.4.3 矩阵运算

矩阵运算是一种数字数组参数之间的数学运算，如矩阵乘法、计算转置矩阵、求解联立方程组等。本部分将要讨论的命令有*MOPER、*MFUN 和*MFouri。

*MOPER (Utility Menu→Parameters→Array Operations→Matrix Operations)

功能：对两个输入数组参数矩阵进行矩阵运算，输出一个数组参数矩阵。

命令格式：*MOPER,ParR,Par1,Oper,Par2,Par3,kDim,kOut

其中，ParR 是运算结果数组矩阵名，Par1 是第 1 个参与运算的数组参数矩阵，Oper 是矩阵运算法则。矩阵运算法则包含下列 8 种。

- ◆ MAP：将其他程序的结果映射到 ANSYS 有限元模型上。例如，可以将 CFD 程序计算的压力转化到结构分析的模型上。Par2 和 Par3 参数定义输入值和它们的位置，接下来的 3 个参数确定搜索的面和插值准则。
- ◆ MULT：矩阵相乘，即 Par1 乘以 Par2。
- ◆ SOLV：求解联立方程组，形如 $a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m$ ，其中 Par1 是包含方程系数的矩阵，Par2 是包含等式右边 b 值的矢量，ParR 是 x 的结果矢量。
- ◆ INVERT：方阵的转置运算。
- ◆ SORT：矩阵排序运算。
- ◆ COVAR：两个矢量之间的协方差。
- ◆ CORR：计算两个矢量之间的相关性。
- ◆ NNEAR：搜索最近的节点，即根据给定数组的容差范围快速确定所包含的所有节点，命令格式如*MOPER,ParR,XYZ(1,1),NNEAR,Toler。

Par2 是参与运算的第 2 个数组参数矩阵（仅当 Oper=COVAR 或 CORR 时需要）。

Par3 是参与运算的第 3 个数组参数矩阵（仅当 Oper=MAP 时需要）。

kDim 是插值准则，当 Oper=MAP 时，如果 kDim=2 或者 0，则进行二维插值（面上插值），如果 kDim=3 则进行三维插值（体上插值）。

Ratio 是搜索半径，默认为 0.1，只用于 Oper=MAP 时。

kOut 是外插准则，只用于 Oper=MAP 时，如果 kOut=0 则保存区域外插值的结果，如果 kOut=1 则将区域外插值的结果置零。

*MFUN (Utility Menu→Parameters→Array Operations→Matrix Functions)

功能：复制或转置一个数组参数矩阵（接受一个输入矩阵，生成一个输出矩阵）。

命令格式：*MFUN,ParR,Func,Par1

其中，ParR 是结果数组参数矩阵名，Func 是矩阵复制或转置函数。

- ◆ COPY: Par1 被复制到 ParR。
- ◆ TRAN: Par1 转置变换到 ParR。

其中，Par1 是输入数组矩阵。

*MFOURI (Utility Menu→Parameters→Array Operations→Matrix Fourier)

功能：计算傅立叶级数的系数或求傅立叶级数。

命令格式：*MFOURI,Oper,COEFF,MODE,ISYM,THETA,CURVE

其中，Oper 是傅里叶级数运算的类型，主要有以下两种类型。

- ◆ FIT: 根据 MODE、ISYM、THETA 和 CURVE 计算傅里叶系数 COEFF。
- ◆ EVAL: 根据 COEFF、MODE、ISYM 和 THETA 计算傅里叶曲线 CURVE。

COEFF 是数组参数矢量名，存储傅里叶系数；

MODE 是数组参数矢量名，包含傅里叶项的级数；

ISYM 是数组参数矢量名，傅里叶项的对称性关键字。该矢量应当包含每一项的该关键字，取值如下。

- ◆ 为 0 或 1，即为对称（cosine）项。
- ◆ 为-1，即为非对称（sine）项。

THETA 和 CURVE 是数组参数矢量名，包含 THETA 与 CURVE 的对应关系描述。THETA 值必须按度进行输入。当 Oper=FIT 时，必须提供对应于 THETA 值的一条曲线的值，当 Oper=EVAL 时，将计算提供每个 THETA 值的对应的曲线值。

5.3.5 矢量和矩阵运算设置

*VCUM、*VABS、*VFACT、*VLEN、*VCOL 和 *VMASK 等命令可以直接影响数组参数矢量运算和矩阵运算的结果（在所有命令中，只有 *VLEN 和 *VMASK，与 *VREAD 或 *VWRITE 连用时，对字符数组参数有效）。除 *VSTAT 命令之外，下面将要介绍的其他所有的命令都可以通过菜单命令 Utility Menu→Parameters→Array Operations→Operation Settings 得到。每次执行向量或矩阵运算之后，所有规定命令都将重置为默认设置。

*VCUM

指定结果累积或不累积（覆盖已有结果）。ParR 为向量运算的结果，要么被加入一个已存在的同名参数中，要么被覆盖。默认为不累积结果，即 ParR 覆盖掉已存在的同名参数。

*VABS

使向量运算中的某个或所有参数取绝对值。默认为实数值。

*VFACT

对向量运算中的某个或所有参数乘以一个比例因子。比例因子默认为 1.0。

*VCOL

指定矩阵运算中列的数目。默认从指定起始处填满结果数组的所有位置。

*VSTAT

列出数组参数的当前状态。

*VLEN

指定数组参数运算中被用到的行的数目。

*VMASK

指定某个数组作为屏蔽向量。

表 5.7 中列出了各类规定命令及其影响到的向量和矩阵运算命令。

表 5.7 矩阵运算命令

	*VABS	*VFACT	*VCUM	*VCOL	*VLEN	NROW, NINC	*VMASK
*MFOURI	No	No	No	N/A	No	No	No
*MFUN	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
*MOPER	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
*VFILL	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VFUN	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VGET	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VITRP	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VOPER	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VPLOT	No	No	N/A	N/A	Yes	Yes	Yes
*VPUT	Yes	Yes	No	N/A	Yes	Yes	Yes
*VREAD	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VSCFUN	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VWRITE	No	No	N/A	N/A	Yes	Yes	Yes

5.4 APDL 程序结构

运行一个输入文件时，ANSYS 通常逐行执行程序，即按顺序一条一条语句地执行程序。但是，APDL 提供了一套丰富的命令来控制程序流。

- ◆ 子程序调用（宏嵌套）。
- ◆ 宏内部的无条件分支*GO。
- ◆ 宏内部的条件分支*IF。
- ◆ 重复执行某一条命令，增加一个或多个命令参数值。
- ◆ 按指定次数循环执行宏的某部分。

下面讲解这些程序控制命令的功能和详细语法。

5.4.1 子程序调用（宏嵌套）

APDL 最多允许嵌套 20 层宏，其宏嵌套功能与 FORTRAN 77 中的 CALL 语句或函数调用功能相似。最多可以传递 19 个变量给宏，每个嵌套的宏运行完毕后，程序控制权返回给调用该宏的那一层。例如，在下面的宏库文件中，宏 MYSTART 调用宏 MYSPHERE 来生成一个球体：

```
mystart
/prep7
/view,,-1,-2,-3
mysphere,1.2
finish
/eof
mysphere
sphere,arg1
/eof
```

5.4.2 无条件分支*GO

最简单的转向命令*GO 指示程序转到某个指定标识字行处，不执行中间的任何命令。程序继续从该指定标识字行处开始执行。*GO 命令的使用格式如下：

```
*GO,Base
```

其中，Base 是无条件分支的动作，有以下两种。

- ◆ label：以冒号开头的标识字，包含冒号的最大长度为 8 个字符的字符串，可以位于同一文件中的任何位置行。程序读取此命令后，直接跳转到后边的第一个:label 标识字处。
- ◆ STOP：流程运行该行时将退出 ANSYS 程序。

需要注意的是，*GO 命令不能与条件分支和循环体混合使用，不能从循环体或条件分支中跳转。一般情况下不鼓励使用*GO，最好使用其他的分支命令来控制程序流。

例如：

```
*GO, :BRANCH1
...    ! 这个程序体被跳过 (不执行)
...
:BRANCH1
...
...
```

5.4.3 条件分支*IF

APDL 允许根据条件执行某些供选择的程序体中的一个。条件的值通过比较两个数的值（或等于某数值的参数）来确定。

*IF 命令的格式如下：

```
*IF, VAL1, Oper, VAL2, Base
```

其中，VAL1 是比较的第一个数值（或数字参数）；VAL2 是比较的第二个数值（或数字参数）；Oper 是比较运算符，若比较的值为真，则执行 Base 指定的操作。

简要地说，比较运算符主要有如下几种。

- ◆ EQ: 等于 (VAL1=VAL2)。
- ◆ NE: 不等于 (VAL1≠VAL2)。
- ◆ LT: 小于 (VAL1<VAL2)。
- ◆ GT: 大于 (VAL1>VAL2)。
- ◆ LE: 小于或等于 (VAL1≤VAL2)。
- ◆ GE: 大于或等于 (VAL1≥VAL2)。
- ◆ ABLT: 绝对值小于。
- ◆ ABGT: 绝对值大于。

通过给 Base 变量赋值 THEN，*IF 命令就变成了 if-then-else 结构（和 FORTRAN 中的该结构类似）的开始。该结构包括一个*IF 命令，接下来是一个或多个*ELSEIF 命令选项、一个*ELSE 命令选项、一个必需的*ENDIF 命令，标识该结构的结束。

在最简单的形式中，*IF 命令判断比较的值，若为真，则转向 Base 变量所指定的标识字处。结合一些*IF 命令，将能得到和其他编程语言中 CASE 语句相同的功能。



不要转向某个位于 if-then-else 结构或 do 循环中的带标识字的行。

if-then-else 结构仅仅判断条件并执行接下来的程序体或跳到*ENDIF 命令的下一条语句处（用“Continue”注释表示）：

```
*IF, A, EQ, 1, THEN
    ! Block1
    ...
    ...
*ENDIF
! Continue
```

下面的例子用来说明一个较复杂的结构。注意，只能执行一个程序体。假如比较条件都不为真，就执行*ELSE 命令后的程序体。

if-then-else 结构的例子如图 5.7 所示。

注意，可以在 if-then-else 结构中执行 /CLEAR 命令。/CLEAR 命令不会清除*IF 堆栈，*IF 层的号码仍然保留。必须用*ENDIF 来结束分支。同时，/CLEAR 命令会删除所有的参数，包括在分支命

令中使用的任何参数。为避免由于删除参数而引发问题，可以在/CLEAR 命令前运行/PARSAV 命令，然后在/CLEAR 命令后立刻运行/PARRES 命令。

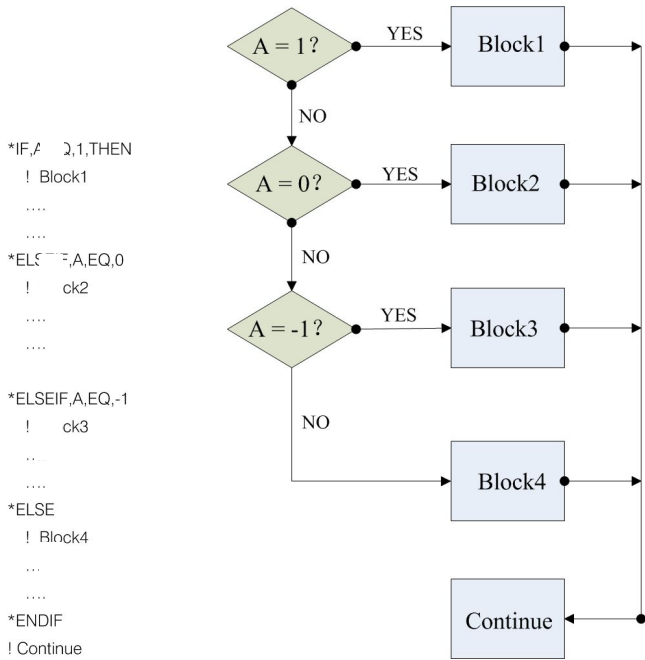


图 5.7 if-then-else 结构图

5.4.4 重复执行一个命令*REPEAT

***REPEAT** 命令是最简单的循环命令，通过它可以直接按指定的次数执行上一条命令，并且命令中的参数可以按定值增加。

***REPEAT** 命令的使用格式如下：

```
*REPEAT, NTOT, VINC1, VINC2, VINC3, VINC4, VINC5, VINC6, VINC7, VINC8, VINC9, VINC10, VINC11
```

其中，**NTOT** 是命令重复执行的次数，该数目包括初始执行，所以必须是大于 2 的整数；**VINC1-VINC11** 是命令的第 1 到第 11 个参数在每次循环时的增量，即每次循环时命令参数会按指定数值增加。

例如：

```
E, 1, 2
*REPEAT, 5, 0, 1
```

E 命令在节点 1 和 2 之间创建一个单元，***REPEAT** 命令指示执行 **E** 命令 5 次(包括最初的一次)，每执行一次第二个节点号加 1。结果共生成 5 个单元：1-2，1-3，1-4，1-5 和 1-6。

对大多数以斜线 (/) 或星号 (*) 开头的命令，和扩展名不是 .mac 的宏，都不可以重复调用。但是，以斜线 (/) 开头的图形命令可以重复调用。同时，要避免对交互式命令使用 ***REPEAT** 命令，比如那些需要拾取或需要用户响应的命令。

5.4.5 循环命令*DO

DO** 循环允许按指定的次数循环执行一系列命令。DO** 和***ENDDO** 命令分别是循环开始和结束点的标识字。

***DO** 命令的格式如下：

```
*DO, Par, IVAL, FVAL, INC
```

其中，**Par** 是循环控制变量，只能是数值型变量；**IVAL**、**FVAL** 和 **INC** 分别是循环控制变量的起始值、终止值与步长，**INC** 的默认值为 **1**。在构造 **DO** 循环时，必须遵守以下原则。

- ◆ 不要利用带有**:Label** 分支语句的***IF** 或者***GO** 命令跳出 **DO** 循环结构。
- ◆ 不要在 **DO** 循环结构中用**:Label** 将程序流跳到另外一行语句，而要用 **if-then-else-endif** 结构来实现。
- ◆ 在 **DO** 循环结构中，第一次循环后自动禁止命令结果输出。
- ◆ 在 **DO** 循环结构中使用**/CLEAR** 命令要特别小心。

5.4.6 控制函数列表

表 5.8 中描述了在宏中具有控制函数功能的 **APDL** 命令。

表 5.8 宏中具有控制函数功能的 APDL 命令

APDL 命令	作用	用法提示
*DO	定义循环开始。紧接*DO 之后的命令（在*ENDDO 之前）反复执行，直到满足循环控制条件	命令格式为*DO, Par, IVAL, FVAL, INC，其中： Par 是用做循环指标的标量参数； IVAL 和 FVAL 分别是参数 Par 的初始值和最终值； INC 为每循环一次，IVAL 的增量。 可以通过*IF 命令来控制循环。 ANSYS 最多允许嵌套 20 层的“do”循环，但是包含/INPUT、*USE 或“未知命令”宏的“do”循环支持少一些的嵌套层数，这是因为这些命令会进行内部的文件转换。在“do”循环中不要包含拾取操作。 在 do-loop 结构中使用/CLEAR 命令要特别小心。/CLEAR 命令不会清除 do-loop 堆栈，但是它会删除所有的参数，包括在本身的*DO 语句中的循环参数。为避免由此引发的循环值未定义的问题，可以在/CLEAR 命令前运行/PARSAV 命令，然后接着/CLEAR 命令运行/PARRES 命令
*ENDDO	结束一个“do”循环，并开始下一个循环	对每一个嵌套的“do”循环，都要有一个*ENDDO 命令。一个循环的*ENDDO 和*DO 命令必须在同一个文件中
*CYCLE	执行“do”循环时，ANSYS 程序绕过所有在*CYCLE 和 *ENDDO 之间的命令，然后开始下一个循环	可以有条件地使用 cycle 选项（通过*IF 命令）。 *CYCLE 命令必须和*DO 命令处于同一文件中，并且在*ENDDO 命令之前
*EXIT	跳出“do”循环	该命令紧接着*ENDDO 命令之后的下一行执行。一个循环的*EXIT 和*DO 命令必须在同一个文件中。可以有条件地使用 exit 选项（通过*IF 命令）

(续表)

APDL 命令	作用	用法提示
*IF	按条件执行命令	<p>命令格式为：*IF, VAL1, Oper, VAL2, Base, 其中：</p> <p>VAL1 是比较的第一个数值（或数字参数）；</p> <p>Oper 是比较运算符：EQ（等于），NE（不等于），LT（小于），GT（大于），LE（小于或等于），GE（大于或等于），ABLT（绝对值小于）或 ABGT（绝对值大于）。</p> <p>VAL2 是比较的第二个数值（或数字参数）；</p> <p>若比较的结果为真，则执行 Base；若为假，则执行下一条语句。</p> <p>Base 可能为：</p> <ul style="list-style-type: none">- :label（跳到以标识字 label 开头的语句处）- STOP（跳出 ANSYS 程序）- EXIT（跳出当前的“do”循环）- CYCLE（跳到当前“do”循环的结束处）- THEN（构造 if-then-else 结构） <p>*IF 程序体最多可嵌套 10 层。不能在“do”循环或 if-then-else 结构中跳到某个:label 行。</p> <p>可以在 if-then-else 结构中执行 /CLEAR 命令。/CLEAR 命令不会清除*IF 堆栈，*IF 层的号码仍然保留。必须用*ENDIF 来结束逻辑分支。同时，/CLEAR 命令会删除所有的参数，包括在分支命令中使用的任何参数。为避免由于删除参数而引发问题，可以在 /CLEAR 命令前运行 /PARSAV 命令，然后接着 /CLEAR 命令运行 /PARRES 命令</p>
*ENDIF	终止 if-then-else 结构	*IF 和*ENDIF 命令必须处于同一文件中
*ELSE	在 if-then-else 结构中生成最后一个可选择的程序体	*ELSE 和*ENDIF 命令必须处于同一文件中
*ELSEIF	在 if-then-else 结构中生成一个可选择的中间程序体	<p>命令格式为*ELSEIF, VAL1, Oper, VAL2, 其中：</p> <p>VAL1 是比较的第一个数值（或数字参数）；</p> <p>Oper 是比较运算符：EQ（等于），NE（不等于），LT（小于），GT（大于），LE（小于或等于），GE（大于或等于），ABLT（绝对值小于）或 ABGT（绝对值大于）。</p> <p>VAL2 是比较的第二个数值（或数字参数）；</p> <p>如果 Oper=EQ 或 NE，VAL1 和 VAL2 可以是字符串（括在单引号中）或参数。</p> <p>*IF 和 *ELSEIF 命令必须处于同一文件中</p>

5.5 宏文件

为了多次使用的方便以及编程时命令序列的精简，我们可以把常用的 ANSYS 命令序列单独定义保存，以后当需要运行本段命令序列的时候可以随时调用。这样的命令序列也就是 APDL 宏文件，宏文件的后缀名为 **mac** 或 **MAC**。当然，除了执行一系列的 ANSYS 命令外，宏还可以调用 GUI 函数或者把值传递给参数。

宏支持相互嵌套，也就是说，宏的命令序列里面也可以调用其他宏，最多可以嵌套 20 层。宏

文件可用文本编辑器创建或从 ANSYS 程序内部进行创建,可以包括 APDL 特性的任何内容,如参数、重复功能、分支等。在 ANSYS 内部建立宏时,用户指定复制程序命令集到一个特定的文件,当宏被建立时它们自动地存储在用户目录中,然后可以利用它重复执行包含在宏中的命令序列。

在宏命令中,可以用 *ASK 命令定义参数,这样做的好处是可以根据用户说明信息提示参数值。这一特点使得其在自动分析方面非常方便,因为自动分析中的一些基本参量在每个设计中都是不同的。

*MSG 也是一个在宏中常用的命令,该命令允许将参数和用户提供的信息写入用户可以控制的输出文件,这项功能可为用户在 ANSYS 内部创建特定的报告或产生可供外部程序读取的输出文件。

ANSYS 提供了几个预先写好的宏,如自适应网格划分、动画宏命令等,其他一些宏由用户根据需要制定。

下面是一个简单的宏文件的例子。在本例中,宏生成一个尺寸为 4, 3, 2 的长方形块和一个半径为 1 的球体。然后,从块的一个角处减去球体。

```
/prep7
/view,,-1,-2,-3
block,,4,,3,,2
sphere,1
vsbv,1,2
finish
```

假如这个宏文件取名为 mymacro.mac,那么就可以用这样一个 ANSYS 命令来执行以上的命令序列: *use,mymacro 或 mymacro (因为扩展名为 .mac)。

很显然,这个宏的功能并不十分强大,但它很好地说明了宏的原理。

5.5.1 宏的创建

可以在 ANSYS 中创建宏,也可以通过文本编辑器(如 WINDOWS 记事本程序)创建宏。如果要生成的宏很简单,那么在 ANSYS 中生成就非常方便了;如果要生成一个长的复杂的宏,或者要编辑一个已经存在的宏,那么最好使用文本编辑器。使用文本编辑器,可利用一个已经存在的类似的宏或 ANSYS 日志文件来生成自己的宏。

如果生成的宏既长且复杂,那么最好从一个已经存在的类似的宏着手,或者先通过交互模式完成该任务,再以生成的日志文件作为基础生成宏。这两种方法都可以大大地缩短所需耗费的时间和精力。

宏就是保存在一个文件中的 ANSYS 命令序列。宏不能与已经存在的 ANSYS 命令同名,否则,ANSYS 执行的将是内部的命令,而不是宏。给新建的宏命名必须遵守以下规则。

- ◆ 文件名不能超过 32 个字符。
- ◆ 文件名不能以数字开头。
- ◆ 文件扩展名不能超过 8 个字符(如果想和执行 ANSYS 命令一样执行宏,该宏的扩展名应为 .mac)。
- ◆ 文件名或文件扩展名中不能包含空格。
- ◆ 文件名或文件扩展名不能包含任何被当前文件系统禁止使用的字符,为了具有更好的移置性,还不能包含任何被 UNIX 或 Windows 文件系统禁止使用的字符。



为了确保没有使用 ANSYS 命令名, 在生成宏之前应该试着像运行 ANSYS 命令一样运行准备赋给宏的名称。如果 ANSYS 返回如图 5.8 所示的消息框, 就可以确信在当前处理器中没有该命令。为了安全起见, 应该在计划要用到的每一个处理器中都检查一下宏文件的名称(也可以检查宏文件名是否与在线文档中的某个命令名相同, 但是该方法不能查找不在文档中的命令)。

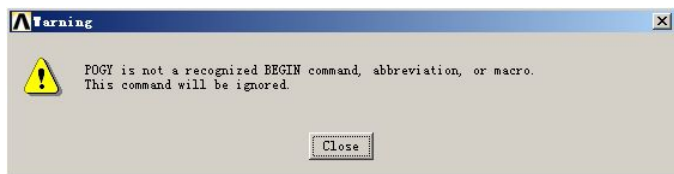


图 5.8 声明执行未知命令的消息框

若使用 .mac 作为扩展名, ANSYS 将像执行内部命令一样执行该宏。扩展名 .MAC 用于 ANSYS 内部的宏, 用户不能使用。

在 ANSYS 中创建宏的的途径主要有 3 种: 在输入窗口执行 *CREATE 命令; 使用 *CFOPEN、*CFWRITE 和 *CFCLOS 命令; 选择 Utility Menu→Macro→Create Macro 菜单命令, 打开一个可作简单的多行编辑器的对话框来生成宏。

5.5.1.1 使用 *CREATE 命令

执行 *CREATE 命令后, ANSYS 将输入窗口中的命令输出到 *CREATE 命令指定的文件中, 直到执行 *END 命令为止。如果已经存在一个和指定宏文件同名的文件, ANSYS 程序将覆盖该文件。*CREATE 命令的格式如下:

```
*CREATE, Fname, Ext
```

其中, **Fname** 是文件名和路径(此处最多可填 250 个字符), 如果不指定路径名, 将默认为当前的工作目录, 这时 250 字符允许全部为文件名; **Ext** 是文件扩展名(最多 8 个字符), 一般使用 mac 为扩展名, 方便当做 ANSYS 命令调用。

例如, 要生成一个名为 matprop.mac 的宏, 用来定义材料特性。从命令输入窗口为该宏输入的命令为:

```
*CREATE, matprop, mac, macros\  
MP, EX, 1, 2.07E11  
MP, NUXY, 1, .27  
MP, DENS, 1, 7835  
MP, KXX, 1, 42  
*END
```

*CREATE 命令中的参数用来指定文件名、扩展名和所在路径。



UNIX 用户必须在路径的尾部再加上一道斜线 (\)。

在实际工作中, 往往将主程序及其调用的宏文件放在一个更大的分析文件中, 把每个需要调用的宏文件都在主程序之前使用 *CREATE 命令创建。这样做的好处是, 只需要一个文件就可以实现全



部分分析，便于存档和复制使用。

5.5.1.2 使用*CFWRITE 命令

使用*CFWRITE 命令可以把命令逐个写入提前用*CFOPEN 打开的宏文件中，直到执行*CFCLOS 命令关闭宏文件为止。在输入窗口输入的命令，只有以*CFWRITE 开头的命令行才会被写入事先打开的宏文件中。这种方法适合在宏文件运行期间对宏文件进行修改。*CFWRITE 命令的格式为：

```
*CFWRITE, Command
```

其中，**Command** 是命令名及其参数，即一个完成命令行的字符串。

例如：*cfwrite,block,,a,,b,,c

*CFOPEN 命令的格式如下：

```
*CFOPEN, Fname, Ext, --, Loc
```

其中，**Fname** 是文件名和路径（此处最多可填 250 个字符），默认文件名是当前的工作名 **Jobname**；**Ext** 是文件扩展名（最多 8 个字符），如果 **Fname** 为空，那么扩展名默认为 **CMD**；**--** 是不需要定义的值域；**Loc** 是确定覆盖已经存在的同名文件，还是向同名文件中追加信息，留空表示覆盖，填入 **APPEND** 表示追加。

*CFCLOS 命令的格式就是命令本身，不需要任何值域，表示关闭前面由*CFOPEN 命令打开的宏文件。

5.5.1.3 使用 Utility Menu→Macro→Create Macro 命令

通过这个菜单命令可以打开一个作为简单的多行编辑器的对话框来生成宏。但是，不能通过它来打开并编辑已存在的宏。如果在对话框的*CREATE 域输入一个已经存在的宏名，那么该已经存在的宏就会被覆盖。**Create Macro** 对话框示例如图 5.9 所示。

和*CREATE 命令一样，参数不被求值，写入文件中的为参数名。注意，最后一行不能为*END 命令。

5.5.2 宏的使用

可以通过*USE 命令来运行任何宏文件。例如，要运行在宏搜索路径中某个位置处的宏 **MYMACRO**（无扩展名），可通过执行以下命令来实现：

```
*use, mymacro
```

本例中，宏不带参数。如果要运行在 /myaccount/macros 处的宏 **MYMACRO.MACRO**，那么执行的命令为：

```
*use, /myaccount/macros/mymacro.macro
```

注意，在*USE 命令中，路径、文件名和扩展名是作为一个参数输入的。

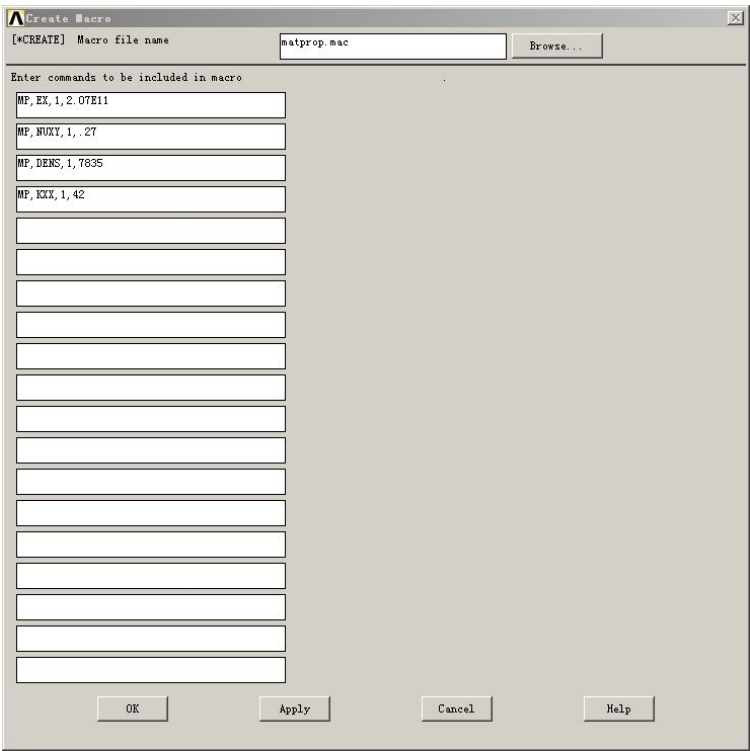


图 5.9 Create Macro 对话框示例

如果宏的文件扩展名为`.mac`，并且在宏的搜索路径中，那么就可以把它当做 **ANSYS** 命令来运行，在命令输入窗口中直接输入即可。例如，要运行一个名为 `mymacro.mac` 的宏：

```
mymacro
```

也可以通过 **Utility Menu→Macro→Execute Macro** 命令来运行扩展名为`.mac` 的宏。如果上一个宏带有参数，那么在命令行输入的内容为：

```
mymacro,4,3,2,1.5
```

或

```
*use,mymacro.mac,4,3,2,1.5
```

Utility Menu→Macro→Execute Macro 命令可提供输入参数的域。

比较特殊的是宏库文件中的宏的调用。为方便起见，**ANSYS** 允许把一批宏放到一个文件中，该文件被称为宏库文件。通过`*CREATE` 命令或文本编辑器都可以达到这一目的。宏库文件没有明确的文件扩展名，若有，不能超过 **8** 个字符。其文件名的命名规则和宏文件一样。宏库文件的结构为：

```
MACRONAME1
...
...
...
/EOF
MACRONAME2
```

```
...
...
...
/EOF
MACRONAME3
...
...
...
./EOF
```

注意，每个宏的开始处都有一个宏名（有时也被称为数据块名），并以一个 **/EOF** 命令结束。

宏库文件可以放在系统中的任何地方，为方便起见，最好放在宏的搜索路径中。

运行存在于宏库中的宏的方法也是相似的。首先，用 ***ULIB** 命令指定库文件。例如，要运行存在于 **/myaccount/macros** 路径处的 **mymacros.mlib** 文件中的宏，先指定库文件：

```
*ulib,mymacros.mlib,/myaccount/macros/
```

选择完宏库之后，就可以通过 ***USE** 命令来运行任何包含在该库中的宏。同样也可以在 ***USE** 命令中指定该宏所带的参数。在执行 ***ULIB** 命令后，不能用 ***USE** 命令去访问没有包含在指定宏库文件中的宏。

5.5.3 局部变量

APDL 提供两套特殊命名的标量参数用做局部变量：一套传递命令行变量到宏；一套在宏内部使用。该局部变量仅在该宏中有效。

下面将详细讨论这两种类型的变量。

5.5.3.1 传递变量到宏

共有 **19** 个标量参数可以被用来从宏运行的命令行中传递变量到宏中。这些标量参数可以被许多宏重新使用，也就是说，它们的值只在每个宏的范围内有效。其参数名为从 **ARG1** 到 **ARG19**，可用于以下项目。

- ◆ 数值。
- ◆ 文字数字字符串（括在单引号中，最多 **8** 个字符）。
- ◆ 数字或字符参数。
- ◆ 参数表达式。

注意，只有从 **ARG1** 到 **ARG18** 的参数的值可以用 ***USE** 命令传递到宏中。对于可以像 **ANSYS** 命令一样运行的宏（该宏文件扩展名为 **.mac**），可以传递从 **ARG1** 到 **ARG19** 的参数的值到宏中。

例如，下面的宏需要 **4** 个变量：**ARG1**、**ARG2**、**ARG3** 和 **ARG4**。

```
/prep7
/view,, -1, -2, -3
block,, arg1,, arg2,, arg3
sphere, arg4
vsbv, 1, 2
```

```
finish
```

按如下方式运行该宏：

```
mymacro,4,3,2.2,1
```

5.5.3.2 宏内有效的局部变量

每个宏最多可有 **79** 个标量参数用做局部变量（从 **ARG20** 到 **ARG99**）。这些参数只在宏内部有效。在宏嵌套中，这些参数也不会互相传递。可以将它们传进任何一个通过执行 **/INPUT** 命令调用的文件或宏的“do”循环中。

ANSYS 还有一套类似的从 **ARG1** 到 **ARG99** 的标量参数，它们在某个输入文件中有效，但不会传递到该输入文件调用的宏中。因此，一旦宏运行完毕，控制权返回给输入文件，**ARG1** 到 **ARG99** 参数的值恢复为在该输入文件中定义的值。

5.6 小结

本章较为系统地介绍了 **APDL** 语言的特点、参数及变量参数的用法、数组参数的用法、**APDL** 语言的程序结构及宏文件的使用等内容。本章对 **APDL** 的介绍着重于它的一些基本功能，其间也夹杂了一些实例，期望能够加强读者对 **APDL** 语言应用的技巧。需要说明的是，**APDL** 中的参数化建模是十分复杂有效的，笔者希望本章所述内容及实例能够起到举一反三的作用，让读者领会 **APDL** 语言的精髓，并能够完成复杂程度较高的使用功能及操作技巧。



Part

第 2 部分 ANSYS 结构有限元 分析基本过程

第 6 章 ANSYS 杆系结构有限元分析

第 7 章 ANSYS 梁系结构有限元分析

第 8 章 ANSYS 板壳结构有限元分析

第 9 章 ANSYS 实体结构有限元分析

2

第 6 章 ANSYS 杆系结构有限元分析

本章包括

- ◆ 杆系结构有限元分析基本过程
- ◆ ANSYS 中提供的杆单元简介
- ◆ 实例详解 1：传输塔架的静力分析
- ◆ 实例详解 2：立体桁架的静力分析

杆系结构是由若干杆件组成的，在土木、建筑、机械、船舶、水利等工程中应用很广。在杆系结构中，数根杆件的汇交联结处称为节点。在每一个节点处，各杆端之间不得有相对线位移。节点分为铰节点和刚节点。在铰节点上，各杆件之间的夹角可以自由改变，铰节点不能传递力矩；在刚节点上，各杆件之间的夹角保持不变，刚节点能传递力矩。对杆系结构，主要是研究它们在各种因素（如载荷、支座沉降、温度变化等）影响下的内力分布、变形和稳定性，为寻求既安全有效又经济合理的结构形式和验算结构的强度、刚度、稳定性提供依据。

杆系结构按受力的几何特征可分为平面杆系结构和空间杆系结构。全部杆件和全部载荷均处于同一平面之内的，称为平面杆系结构，例如一般的屋盖桁架、多层厂房的刚架等；不处于同一平面内的，称为空间杆系结构，例如空间桁架、输电线塔架等。作为杆系结构分析基础的 3 个基本条件是：①杆件材料的应力—应变关系。分为线性关系（服从胡克定律）和非线性关系。②力系平衡条件。整个结构的力系、部分结构的力系和一个节点的力系，都应满足平衡条件。③变形协调条件，即变形前为某一节点约束的各杆件在变形后仍为同一节点约束。根据上述 3 个条件，可以推演出各种杆系结构的计算方法，用它们不仅能算出结构的杆件内力、支座反力，还能算出结构的变形。结构内部的应力过大，会导致结构失去承载能力；而结构的变形过大，或导致结构失去承载能力，或影响结构的正常使用。

由若干只产生轴力的杆件用铰链联结成的几何不变的结构称为桁架。为使桁架杆件只产生轴力，桁架的计算常作以下假定：①桁架中每根杆件的两端由理想铰联结；②每根杆件的轴线必须是直线；③所有杆件的轴线都只交于所联理想铰的几何中心；④载荷均只作用于理想铰的几何中心。

本章主要讨论节点为铰节点的杆系结构，即桁架结构，介绍在 ANSYS 中进行平面桁架和空间桁架结构有限元分析的基本方法，同时结合工程实例进行详解。

6.1 杆系结构有限元分析基本过程

杆系结构有限元分析是将杆系结构的各个杆件作为基本单元，将节点位移作为基本变量，先对杆件单元进行分析，建立单元杆件内力与位移之间的关系，然后再对结构进行整体分析。根据各节点的变形协调条件和静力平衡条件建立结构上的节点载荷和节点位移之间的关系，形成结构的总刚

度矩阵和总刚度方程。解出各节点位移值后，再由单元杆件内力和位移之间的关系求出杆件内力。下面以空间杆系结构为例阐述杆系结构有限元分析的基本过程。

6.1.1 基本假定

- ◆ 空间杆系结构的节点假设为铰接，每一个节点有 3 个自由度，即 X、Y、Z 位移方向的平动自由度。
- ◆ 杆件只承受轴向的拉力及压力，不考虑弯矩影响。

6.1.2 单元刚度矩阵

6.1.2.1 局部坐标系单刚矩阵

设一局部直角坐标系 ($\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 轴)， \bar{x} 轴与 ij 杆平行。杆的两端有轴向力 N_{ij}, N_{ji} ，在轴向力作用下， i, j 点产生的轴向位移为 Δ_i, Δ_j 。轴向力 N_{ij}, N_{ji} 与位移的关系如下：

$$\left. \begin{aligned} N_{ij} &= \frac{EA}{l_{ij}}(\Delta_i - \Delta_j) \\ N_{ji} &= \frac{EA}{l_{ij}}(\Delta_j - \Delta_i) \end{aligned} \right\} \quad (6-1)$$

式中， l_{ij} 为杆件 ij 的长度， E 为材料的弹性模量， A 为杆件 ij 的截面面积。

写成矩阵形式为：

$$\{\bar{N}\} = [\bar{K}]\{\bar{\Delta}\} \quad (6-2)$$

式中， $[\bar{K}] = \frac{EA}{l_{ij}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ 为杆件局部坐标系单刚矩阵。

6.1.2.2 坐标变换

杆系结构中的所有杆件都可建立局部坐标系单刚矩阵方程。由于杆件的位置不同，各杆的 \bar{x} 轴方向也不同，各杆件的内力和位移不易叠加，故应采用统一坐标系，即结构总体坐标系，通常采用 x, y, z 直角坐标系。

设 N_{ij} 在 x, y, z 轴上的分力为 F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} ， N_{ij} 与 F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} 的夹角（即 \bar{x} 轴与 x, y, z 轴的夹角）分别为 α, β, γ ， N_{ij} 与 F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} 的关系可写成：



$$\begin{cases} F_{xi} = N_{ij} \cos \alpha = N_{ij} l \\ F_{yi} = N_{ij} \cos \beta = N_{ij} m \\ F_{zi} = N_{ij} \cos \gamma = N_{ij} n \end{cases} \quad (6-3)$$

同理， j 点上的轴向力 N_{ji} 在 x, y, z 轴上的分力为 F_{xj}, F_{yj}, F_{zj} ，其表达式为：

$$\begin{cases} F_{xj} = N_{ji} \cos \alpha = N_{ji} l \\ F_{yj} = N_{ji} \cos \beta = N_{ji} m \\ F_{zj} = N_{ji} \cos \gamma = N_{ji} n \end{cases} \quad (6-4)$$

写成矩阵形式为：

$$\{F\} = [T] \{\bar{N}\} \quad (6-5)$$

式中， $\{F\} = [F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}, F_{xj}, F_{yj}, F_{zj}]^T$ 为杆端内力列矩阵，

$[T] = \begin{bmatrix} l & m & n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l & m & n \end{bmatrix}^T$ 为坐标变换矩阵， $\{\bar{N}\} = [N_{ij} \quad N_{ji}]^T$ 为杆端轴向力列矩阵。

同样，设杆端位移 Δ_i, Δ_j 在 x, y, z 轴上的位移分量为 u_i, v_i, w_i 和 u_j, v_j, w_j ，则将 Δ 与 u, v, w 的关系写成矩阵形式为：

$$\{\delta\}_{ij} = [T] \{\Delta\} \quad (6-6)$$

式中， $\{\delta\}_{ij} = [u_i, v_i, w_i, u_j, v_j, w_j]^T$ 为杆端位移列矩阵， $[T]$ 为坐标变换矩阵，

$\{\Delta\} = [\Delta_i \quad \Delta_j]^T$ 为杆端轴向位移列矩阵。

6.1.2.3 杆件整体坐标系的单刚矩阵

将式(6-5)和式(6-6)求逆，分别代入式(6-2)，并注意到 $[T]^{-1} = [T]^T$ ，得：

$$\{F\} = [T] [\bar{K}] [T]^T \{\delta\}_{ij} = [K]_{ij} \{\delta\}_{ij} \quad (6-7)$$

式中， $[K]_{ij}$ 为杆件 ij 在整体坐标系中的单刚矩阵，是一个 6×6 阶的矩阵。



$$[K]_{ij} = [T][\bar{K}][T]^T = \frac{EA}{l_{ij}} \begin{bmatrix} l^2 & & & & & \\ lm & m^2 & & & & \\ ln & mn & n^2 & & & \\ -l^2 & -lm & -ln & l^2 & & \\ -lm & -m^2 & -mn & lm & m^2 & \\ -ln & -mn & -n^2 & ln & mn & n^2 \end{bmatrix} \quad (6-8)$$

6.1.3 结构总刚度矩阵

建立了杆件整体坐标系的单刚矩阵之后, 要进一步建立结构的总刚矩阵。在建立总刚矩阵时, 应满足两个条件, 即 (1) 变形协调条件; (2) 节点内外力平衡条件。根据这两个条件, 可将单刚矩阵的子矩阵的行列编号 (即节点号) 对号入座, 形成总刚矩阵。对于杆系结构中的所有节点, 可逐点列出内外力平衡方程, 联合起来就形成了结构刚度矩阵方程, 其表达式为:

$$[K]\{\delta\} = [P] \quad (6-9)$$

式中, $[K]$ 是结构总刚度矩阵, 是 $3n \times 3n$ 方阵。

6.1.4 边界条件

结构总刚度矩阵 $[K]$ 是奇异的, 尚需引入边界条件以消除刚体位移, 使总刚度矩阵为正定矩阵。边界条件中有固定、弹性约束和强迫位移等, 具体处理时方法不同, 相关有限元书籍中均有阐述, 此处不再赘述。

6.1.5 杆件内力

处理完边界条件后, 通过对式(6-9)的求解, 可得各节点的位移值如下:

$$\begin{bmatrix} N_{ij} \\ N_{ji} \end{bmatrix} = \frac{EA}{l_{ij}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l & m & n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l & m & n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ u_j \\ v_j \\ w_j \end{Bmatrix} \quad (6-10)$$

式中, N_{ij}, N_{ji} 均代表杆件内力, 且两者的绝对值相等。因 N_{ji} 的方向与传统拉、压杆概念一致, 即受拉为正, 受压为负, 故仅计算 N_{ji} 杆件内力即可。

6.2 ANSYS 中提供的杆单元简介

ANSYS 程序中提供了多种杆单元，用来模拟不同场合的应用，如应用于平面桁架的 LINK1 二维杆单元、应用于空间桁架的 LINK8 三维杆单元、应用于悬索的 LINK10 三维仅受拉或仅受压杆单元、应用于二维（板或轴对称）稳态或瞬态热分析的 LINK32 二维热传导杆单元、应用于节点间热传导的 LINK33 三维热传导杆单元和应用于三维有限应变场合的 LINK180 杆单元等。本节重点介绍桁架杆系结构中最常用的 3 种单元类型，即 LINK1、LINK8 和 LINK10 单元。

6.2.1 LINK1 单元特性简介

LINK1 单元可用于不同工程领域，例如桁架、杆件、弹簧等结构。该单元为二维空间杆单元，承受轴向的拉力及压力，不考虑弯矩。每个节点具有 X 和 Y 位移方向的两个自由度，单元不能承受弯矩，只用于铰接结构，应力沿单元均匀分布。LINK1 的几何模型如图 6.1 所示。

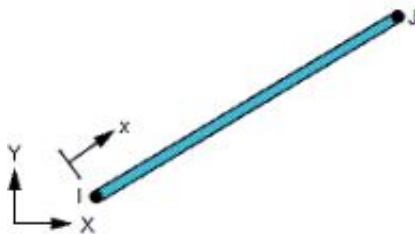


图 6.1 LINK1 的几何模型

图 6.1 中给出了本单元的几何图形、节点坐标及单元坐标系。单元通过两个节点、横截面面积、初始应变和材料属性定义。单元的 X 轴方向为沿单元长度从节点 I 指向节点 J。初始应变通过 Δ/L 给定， Δ 为单元长度 L （由 I、J 节点坐标算得）与零应变单元长度之差。

LINK1 单元在具体应用时存在如下假设与限制：

1. 杆件假设为均质直杆，在其端点受轴向载荷。
2. 杆长应大于 0，即节点 I、J 不能重合。
3. 杆件必须位于 X-Y 平面且截面面积要大于 0。
4. 温度沿杆长方向线性变化。
5. 位移函数的设置使得杆件内部的应力为均匀分布。
6. 初始应变也参与应力刚度矩阵的计算。

LINK1 单元的输入参数总结如表 6.1 所示，更多输入信息可参阅 ANSYS 自带的帮助文件。

表 6.1 LINK1 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	LINK1
节点编号	I、J
自由度	UX、UY
几何参数	AREA、ISTRN

材料特性	EX、ALPX、DENS、DAMP
表面载荷	无
体载荷	温度：T (I)、T (J) 热流量：FL (I)、FL (J)
特殊功能	塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形、单元生死

LINK1 单元的输出图如图 6.2 所示，其求解输出的节点位移包括在全部节点解中。其他输出信息如表 6.2 所示，其中第一列给出了各输出项的名称，用命令 ETABLE (POST1) 及 ESOL (POST26) 可定义这些变量，用于查询，第二列是具体的含义，第三列表示某一变量值是否在输出文件中给出，第四列表示某一变量值是否在结果文件中给出。无论是第三列还是第四列，“Y”表示可以输出，列中的具体数值则表示在满足特定条件时才输出，而“—”则表示不输出。

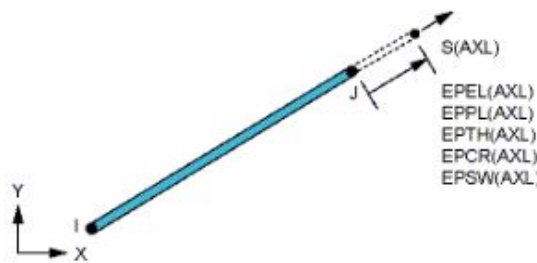


图 6.2 LINK1 单元输出图

表 6.2 LINK1 单元的输出数据定义列表

名称	定义	. out	. rst
EL	单元号	Y	Y
NODES	单元节点号 I、J	Y	Y
MAT	单元材料号	Y	Y
VOLU	单元体积	—	Y
CENT: X, Y	单元几何中心 XC、YC	Y	2
TEMP	单元节点 I、J 的温度	Y	Y
FLUEN	单元节点 I、J 的热流量	Y	Y
MFORX	单元坐标系杆的受力（沿轴方向）	Y	Y
SAXL	轴向应力	Y	Y
EPELAXL	轴向弹性应变	Y	Y
EPHAXL	轴向热应变	Y	Y
EPINAXL	轴向初应变	Y	Y
SEPL	由应力-应变图所得的等效应力	1	1
SRAT	三轴应力与屈服面应力之比	1	1
EPEQ	等效塑性应变	1	1
HPRES	静水压力	1	1
EPPLAXL	轴向塑性应变	1	1
EPCRAXL	轴向蠕变应变	1	1

EPSWAXL	轴向膨胀应变	1	1
---------	--------	---	---

注:

1. 仅适用于非线性材料。
2. 仅在几何中心作为*GET 的一个项目可用。

LINK1 单元的项目和顺序号列表如表 6.3 所示，该表列出了在后处理中可通过 ETABLE 命令加参数及数字顺序号的方法定义可列表查看的有关变量的细则。其中，顺序号是单元数据为常数或单值时对应的序号。

表 6.3 LINK1 单元用于 ETABLE 和 ESOL 命令的输出项和顺序号列表

变量名（名称对应表 6.2）	ETABLE 和 ESOL 命令的输出项			
	输出项	顺序号	I	J
SAXL	LS	1	—	—
EPELAXL	LEPEL	1	—	—
EPHAXL	LEPTH	1	—	—
EPSWAXL	LEPTH	2	—	—
EPINAXL	LEPTH	3	—	—
EPPLAXL	LEPPL	1	—	—
EPCRAXL	LEPCR	1	—	—
SEPL（由应力-应变图所得的等效应力）	NLIN	1	—	—
SRAT（三轴应力与屈服面应力之比）	NLIN	2	—	—
HPRES（静水压力）	NLIN	3	—	—
EPEQ（等效塑性应变）	NLIN	4	—	—
MFORX（单元坐标系杆的受力（沿轴方向））	SMISC	1	—	—
FLUEN（单元节点 I、J 的热流量）	NMISC	—	1	2
TEMP（单元节点 I、J 的温度）	LBFE	—	1	2

6.2.2 LINK8 单元特性简介

LINK8 单元是 LINK1 单元的三维情况，LINK8 三维杆（或桁架）单元是有着广泛工程应用的杆单元，它可以用来模拟桁架、缆索、连杆、弹簧等。这种三维杆单元是杆轴方向的拉压单元，每个节点具有 3 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。就像在铰接结构中的表现一样，本单元不承受弯矩。本单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形、大应变等功能。

对于 LINK8 单元有如下假设：杆单元假定为一根杆，轴向载荷作用在末端，自杆的一端至另一端均为同一属性。杆长应大于零，即节点 I 和 J 不重合。面积也必须大于零。假定温度沿杆长线性变化。位移函数暗含着在杆上具有相同的应力。即便是对于第一次累计迭代，初始应变也被用来计算应力刚度矩阵。LINK8 单元的几何模型如图 6.3 所示，图中给出了本单元的几何图形、节点坐标及单元坐标系。LINK8 单元的输入参数与 LINK1 单元相同，读者可自行参阅 ANSYS 自带的帮助文件。

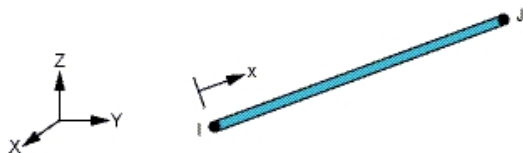


图 6.3 LINK8 的几何模型

LINK8 单元的输出图如图 6.4 所示, 其求解输出的节点位移包括在全部节点解中, 其他输出数据定义及单元的项目和顺序号列表与 LINK1 单元相同, 可参见表 6.2 及表 6.3, 或自行参阅 ANSYS 帮助文件中的单元手册, 此处不再赘述。

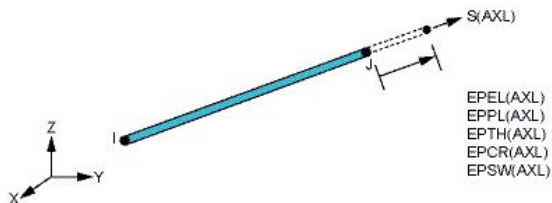


图 6.4 LINK8 单元输出图

6.2.3 LINK10 单元特性简介

LINK10 单元是一个轴向仅受拉或仅受压三维杆单元, 它具有独一无二的双线性刚度矩阵特性。使用只受拉选项时, 如果单元受压, 刚度就消失, 以此来模拟缆索的松弛或链条的松弛。这一特性对于将整个钢缆用一个单元来模拟的钢缆静力问题非常有用。当需要松弛单元的性能, 而不关心松弛单元的运动时, 它也可用于动力分析 (带有惯性或阻尼效应)。

如果分析的目的是研究单元的运动 (没有松弛单元), 那么应该使用类似于 LINK10 的不能松弛的单元, 如 LINK8 或 PIPE59。对于最终收敛结果为绷紧状态的结构, 如果迭代过程中可能出现松弛状态, 那么这种静力收敛问题也不能使用 LINK10 单元, 而应该使用其他单元。

LINK10 单元在每个节点上有 3 个自由度, 即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。不管是仅受拉 (缆) 选项, 还是仅受压 (裂口) 选项, 本单元都不包括弯曲刚度。本单元具有应力刚化和大变形功能。LINK10 单元的几何模型如图 6.5 所示, 该图给出了本单元的几何图形、节点坐标及单元坐标系。该单元通过两个节点、横截面、初始应变或间隙以及各项同性材料特性来定义。单元的 X 轴是沿着节点 I 到节点 J 的单元长度方向。单元的初始应变 (ISTRN) 由 Δ/L 给出, Δ 是单元长度 L (由节点 I 和 J 的位置来定义) 和零应变长度 L_0 之间的差值。对于缆选项, 负的应变值表示其处于松弛状态; 对于裂口选项, 正的应变值表示其处于裂开状态。裂口的值必须作为每单位长度的值输入。其余输入参数信息可参阅 ANSYS 自带的帮助文件。

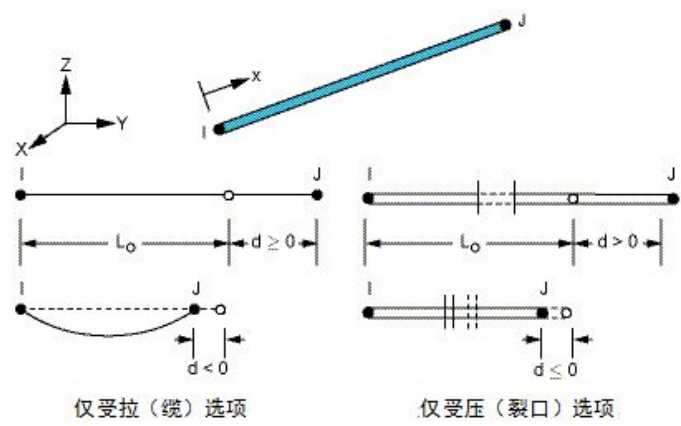


图 6.5 LINK10 的几何模型

LINK10 单元的输出信息如表 6.4 所示，其中，第一列给出了各输出项的名称，用命令 ETABLE (POST1) 和 ESOL (POST26) 可定义这些变量，用于查询，第二列是具体的含义，第三列表示某一变量值是否在输出文件中给出，第四列表示某一变量值是否在结果文件中给出。无论是第三列还是第四列，“Y”表示可以输出，列中的具体数值则表示在满足特定条件时才输出，而“—”则表示不输出。

表 6.4 LINK10 单元的输出数据定义列表

名称	定义	. out	. rst
EL	单元号	Y	Y
NODES	单元节点号 (I、J)	Y	Y
MAT	单元材料号	Y	Y
VOLU:	单元体积	—	Y
XC, YC, ZC	输出结果的位置	Y	2
TEMP	温度 T(I)、T(J)	Y	Y
STAT	单元所处状态	1	1
MFORX	单元坐标系中力的项	Y	Y
SAXL	轴向应力	Y	Y
EPELAXL	轴向弹性应变	Y	Y
EPHAXL	轴向热应变	Y	Y
EPINAXL	轴向初始应变	Y	Y

注：

1. 单元输出状态值。
- 1) —— 缆受拉或者裂口受压。
- 2) —— 缆松弛或者裂口打开。
2. 只有在质心作为*GET 项时可用。

LINK10 单元的项目和顺序号列表如表 6.5 所示，该表列出了在后处理中可通过 ETABLE 命令加参数及数字顺序号的方法定义可列表查看的有关变量的细则。其中，顺序号是单元数据为常数或单值时对应的序号。

表 6.5 LINK10 单元用于 ETABLE 和 ESOL 命令的输出项和顺序号列表

变量名（名称对应表 6.3）	ETABLE 和 ESOL 命令的输出项			
	输出项	顺序号	I	J
SAXL（轴向应力）	LS	1	—	—
EPELAXL（轴向弹性应变）	LEPEL	1	—	—
EPHAXL（轴向热应变）	LEPTH	1	—	—
EPINAXL（轴向初始应变）	LEPTH	3	—	—
MFORX（单元坐标系中力的项）	SMISC	1	—	—
STAT（单元所处状态）	NMISC	1	—	—
OLDST	NMISC	2	—	—
TEMP（温度 T(I)、T(J)）	LBFE	—	1	2

LINK10 单元在具体应用时存在如下假设与限制：

- 1. 单元的长度必须大于 0，因此即节点 I 和 J 不能重合。面积必须大于 0，同时假定温度沿杆长线性变化。
- 2. 如果 ISTRN 等于 0，那么单元的刚度包括在第一个子步内。对于裂口选项（仅受压时），节点 J 相对于节点 I 的正值轴向位移（在单元坐标系中）往往表示裂口打开。
- 3. 求解程序如下：在第一个子步初始时的单元状态决定于初始应变或裂口的输入值，如果对于缆选项该值小于 0，则对于这个子步来说，单元的刚度被认为是 0。如果在这个子步结束时 STAT=2，那么单元的 0 刚度值被用于下一个子步；如果 STAT=1，单元的刚度值包括在下一个子步内。
- 4. 单元是非线性的，且需要一个迭代解。如果单元所处状态在一个子步内改变了，那么该改变的影响在下一个子步内也存在。非收敛的子步不是平衡状态。
- 5. 初始应变也可用来计算应力刚度矩阵，如果有的话，是用在第一次的累积迭代中。应力刚化总是用来为缆下垂问题提供数值稳定。应力刚化和大变形影响可以和一些缆的问题一起使用。

6.3 杆系结构有限元分析实例详解 1：传输塔架的静力分析

6.3.1 问题描述与分析

如图 6.6 所示的传输塔架，杆截面面积为 0.25m²，弹性模量为 2.1×10¹¹N/m²，泊松比为 0.3。用 ANSYS 计算出两个悬臂端节点的竖向位移和支座处的反作用力，并指出结构中的零杆位置。

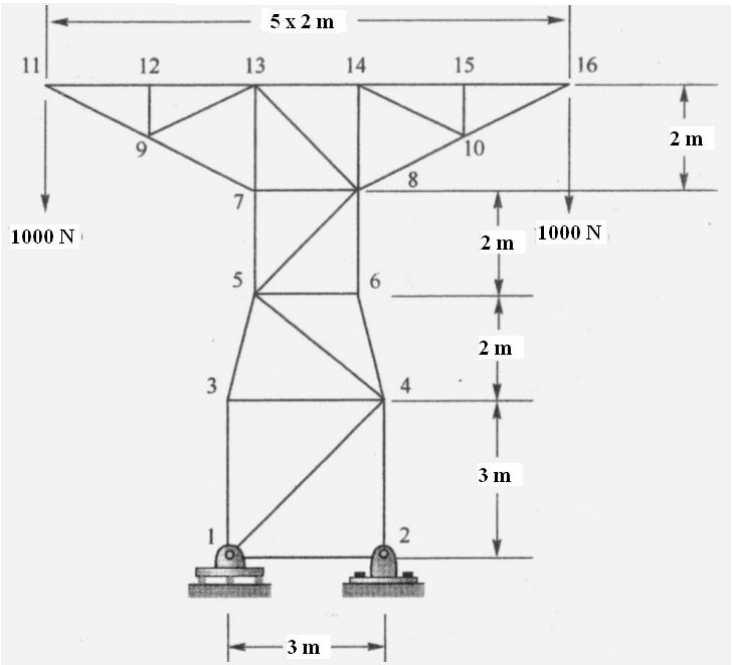


图 6.6 传输塔架结构尺寸图

由于该模型比较简单，故采用直接建立节点和单元的方法进行有限元建模。单元类型选择 LINK1 二维杆单元，单元长度为每个杆件的长度。

6.3.2 求解过程

6.3.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，如图 6.7 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 6\6-1，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter6-1。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

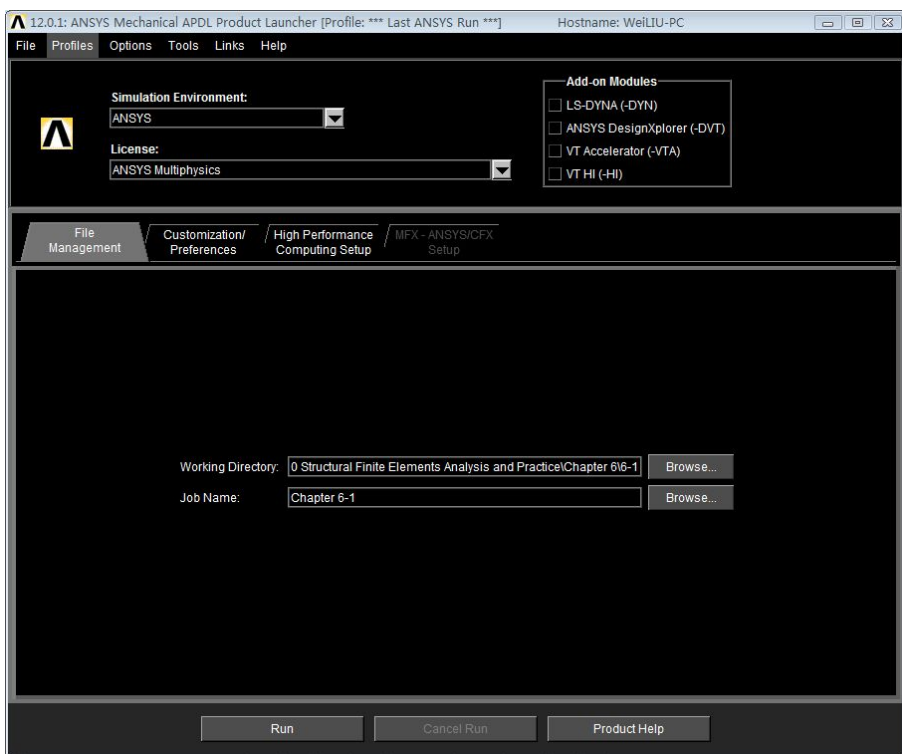


图 6.7 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口



可以先在目标文件位置建立工作目录，然后单击 Browse 按钮选择工作目录；也可以通过单击 Browse 按钮选择工作文件名。

6.3.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1

选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，如图 6.8 所示。在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，如图 6.9 所示。单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link 中的 2D spar 1 单元，如图 6.10 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

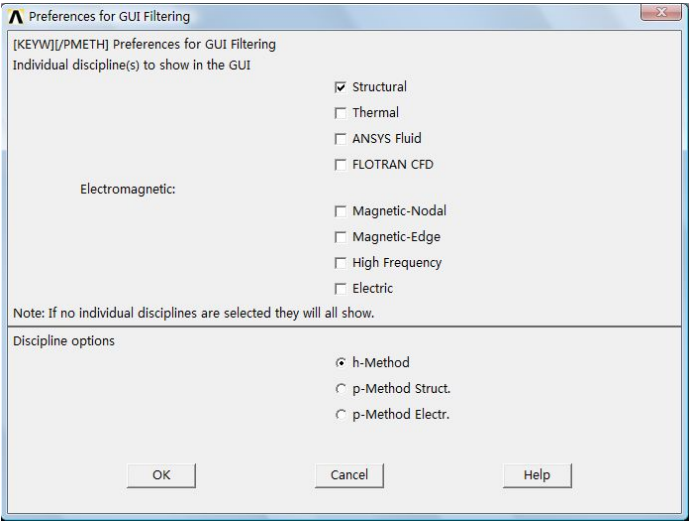


图 6.8 Preferences for GUI Filtering 对话框

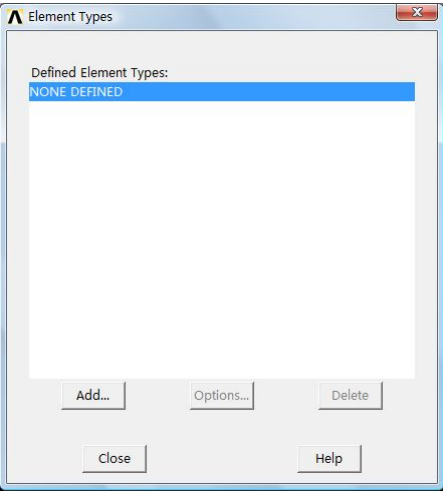


图 6.9 Element Types 对话框

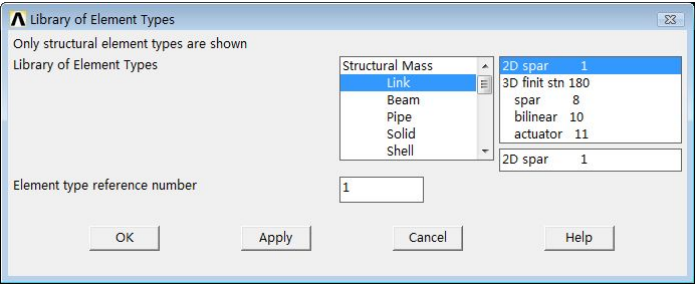


图 6.10 Library of Element Types 对话框

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，如图 6.11 所示，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框。在 EX 输入栏中输入 2.1e11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 6.12 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框

中选择 **Material→Exit** 命令，关闭该对话框。

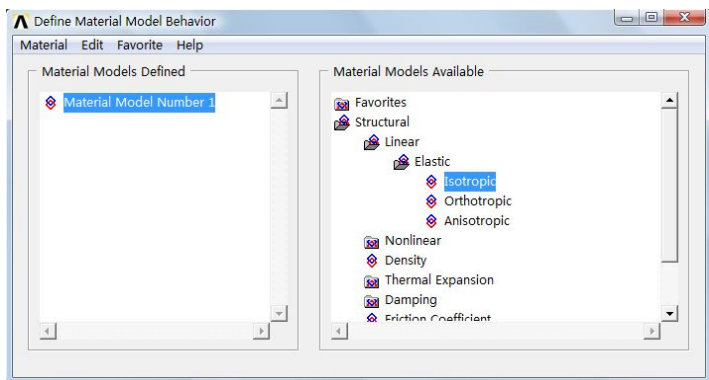


图 6.11 Define Material Model Behavior 对话框

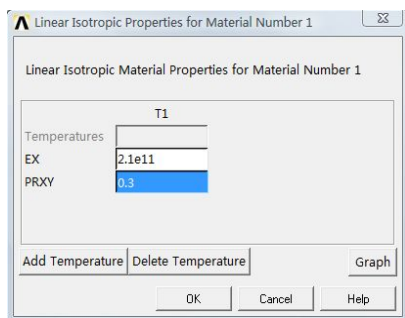


图 6.12 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 4

选择 **Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete** 命令，弹出 **Real Constants** 对话框，如图 6.13 所示。单击 **Add** 按钮，弹出 **Real Constant Set Number 1, for LINK1** 对话框。在 **Cross-sectional area AERA** 输入栏中输入 0.25，如图 6.14 所示，单击 **OK** 按钮关闭 **Real Constant Set Number 1, for LINK1** 对话框，单击 **Close** 按钮关闭 **Real Constants** 对话框。

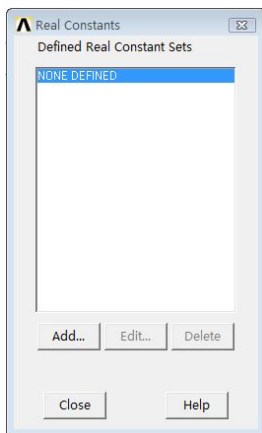


图 6.13 Real Constants 对话框

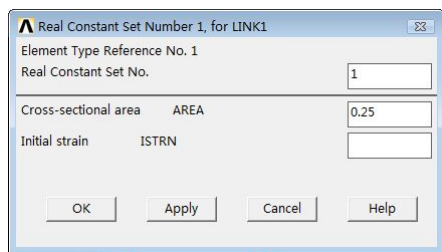


图 6.14 Real Constant Set Number 1, for LINK1 对话框

框

step 5

选择 **Utility Menu→File→Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。



也可单击 按钮或 SAVE_DB 按钮来实现保存操作。

6.3.2.3 创建有限元模型

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS 命令，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 0、0、0，如图 6.15 所示。单击 Apply 按钮建立节点 1，然后用同样的方法依次建立其他节点，节点坐标如表 6.6 所示。

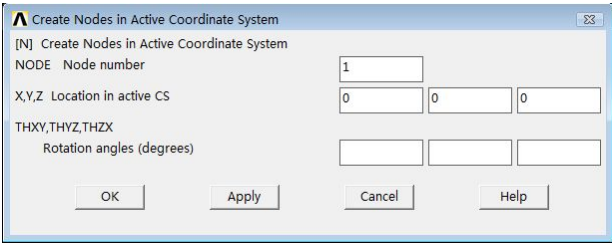


图 6.15 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

表 6.6 节点编号及坐标

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
X 坐标	0	3	0	3	0.	2.	0.	2.	-1	4.	-3	-1	0.	2.	4.	6.
Y 坐标	0	0	3	3	5	5	7	7	8	8	9	9	9	9	9	9

step 2 所有节点建立完之后，选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering... 命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，在 NODE Node Numbers 拾取框处单击打钩，off 变为 on，单击 OK 按钮关闭该对话框，如图 6.16 所示。此时，ANSYS 显示窗口显示生成节点的结果，如图 6.17 所示。

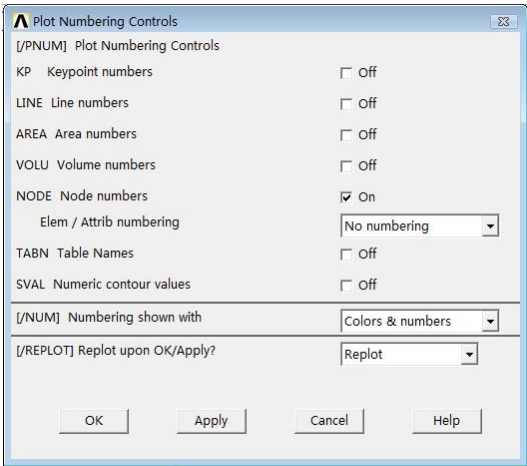


图 6.16 Plot Numbering Controls 对话框

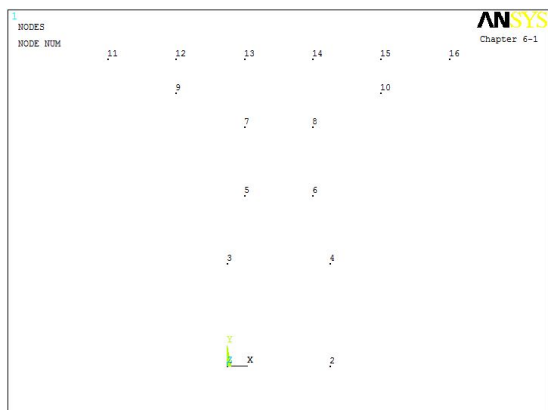


图 6.17 生成节点的结果



在定义节点过程中，也可以不输入节点编号，程序会按照输入次序的先后自动为所有的节点编号。

step 3

选择 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Auto Numbered → Thru Nodes 命令，弹出 Elements from Nodes 拾取框，依次在屏幕上选择各杆件的两端节点，然后单击 Apply 按钮，生成所有的单元，如图 6.18 所示。

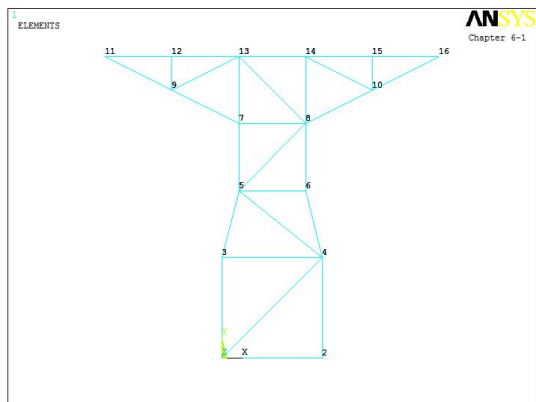


图 6.18 生成所有单元的结果

step 4

至此，我们已经完成了传输塔架的有限元模型的建立，选择 Main Menu → Finish 命令，退出前处理器。

6.3.2.4 加载求解

step 1

选择 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，如图 6.19 所示。用鼠标拾取节点 1，单击 Apply 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框。在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY 选项，如图 6.20 所示，单击 Apply 按钮；再用鼠标拾取节点 2，单击 Apply 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX、UY 选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。ANSYS 窗口显示施加位移约束后的

结果，如图 6.21 所示。

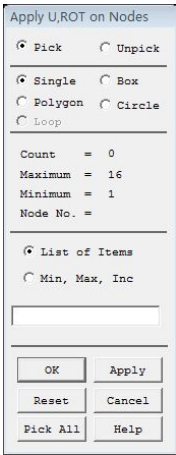


图 6.19 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单

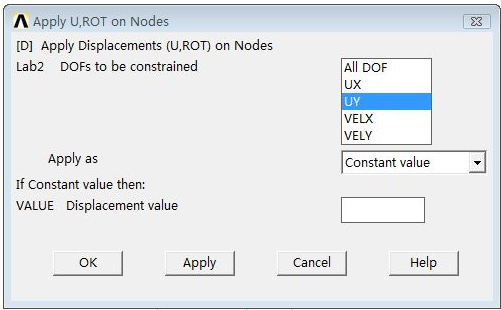


图 6.20 Apply U,ROT on Nodes 对话框

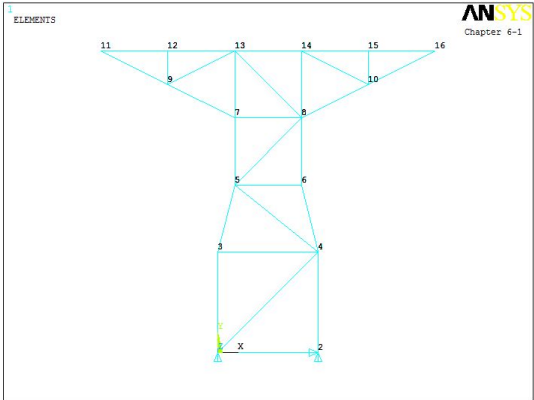


图 6.21 施加位移约束后的结果



该操作为对两个节点进行位移约束，即约束节点 1 的 Y 方向位移和节点 2 的 X、Y 方向位移。由结构力学的知识可知，此时的传输塔架结构为静定结构。

step 2

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes 命令，弹出 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，如图 6.22 所示。用鼠标拾取节点 11 和节点 16，单击 Apply 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 列表框中选择 FY 选项，在 VALUE Force/moment value 输入框中输入-1000，如图 6.23 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 窗口显示施加载荷后的结果，如图 6.24 所示。

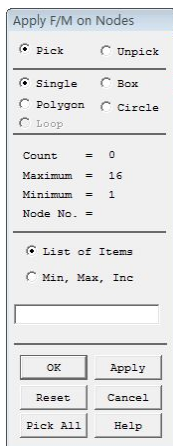


图 6.22 Apply F/M on Nodes 拾取菜单

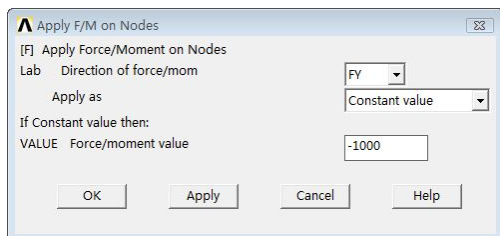


图 6.23 Apply F/M on Nodes 对话框

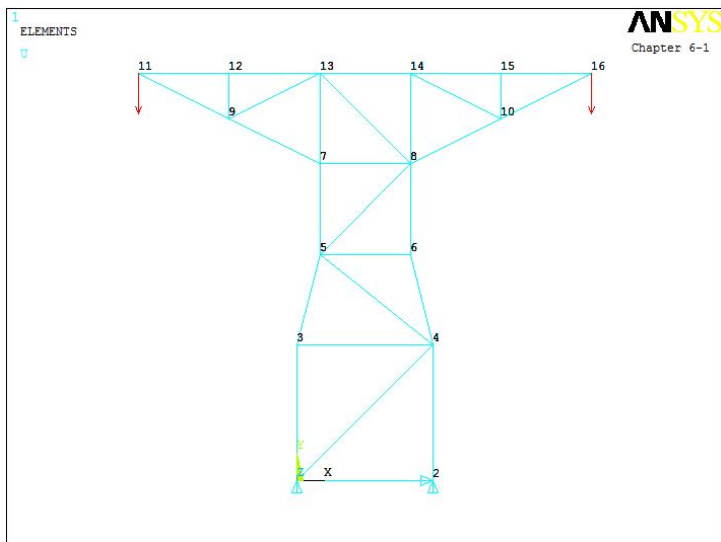


图 6.24 施加载荷后的结果



该操作为对传输塔架施加集中载荷，输入为负值，表示方向为 Y 轴负方向。

step 3

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，如图 6.25 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 4

选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，如图 6.26 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

step 5

求解结束时，出现 Note 对话框，如图 6.27 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

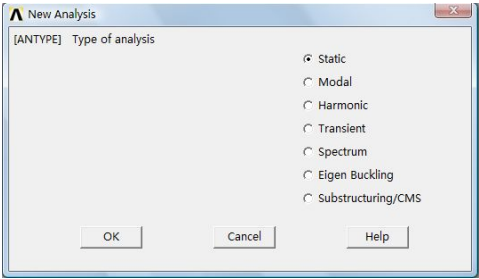


图 6.25 New Analysis 对话框

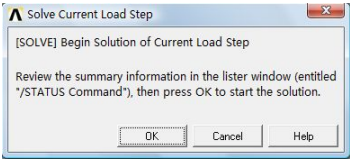


图 6.26 Solve Current Load Step 对话框

框

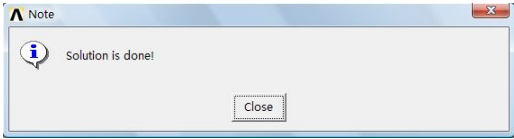


图 6.27 Note 对话框

step 6 选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。至此，加载及求解过程结束，下面开始查看和分析结果。

6.3.2.5 查看求解结果

step 1 选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Deformed Shape** 命令，弹出 **Plot Deformed Shape** 对话框，在 **KUND Items to be plotted** 栏中选择 **Def + undeformed** 单选按钮，如图 6.28 所示。单击 **OK** 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 6.29 所示。从结果中可以看出，节点 11 和节点 16 位移最大，为 0.111e-5m。

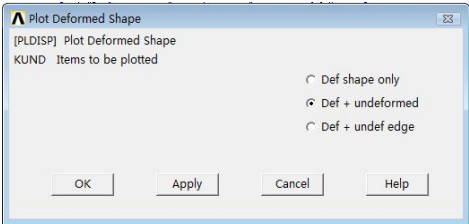


图 6.28 Plot Deformed Shape 对话框

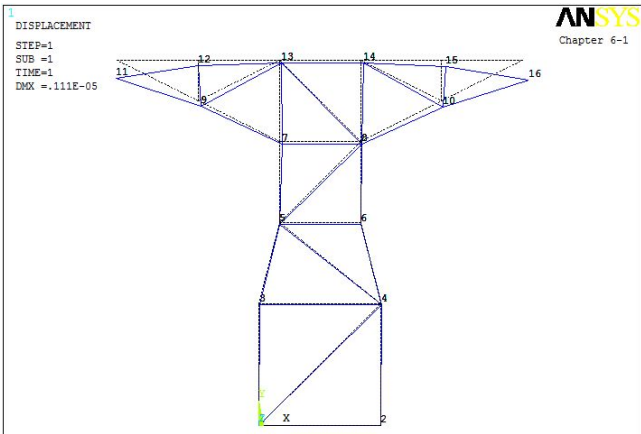


图 6.29 变形后的几何形状和未变形的几何形状

step 2

选择 Main Menu → General Postproc → List Results → Reaction Solu 命令，弹出 List Reaction Solution 对话框。在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All struc force F 选项，如图 6.30 所示，单击 OK 按钮，出现支座节点反作用力结果列表，如图 6.31 所示。

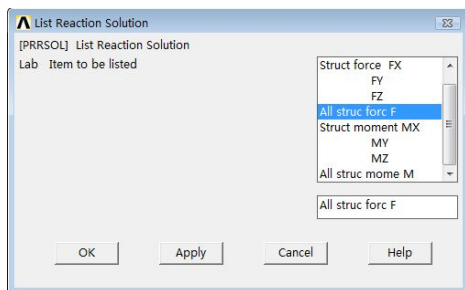


图 6.30 List Reaction Solution 对话框

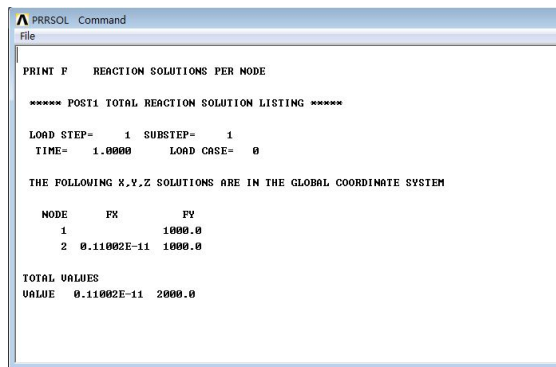


图 6.31 支座节点反作用力结果列表

step 3

选择 Main Menu → General Postproc → Element Table → Define Table 命令，弹出 Element Table Data 对话框，如图 6.32 所示。单击 Add... 按钮，弹出 Define Additional Element Table Items 对话框，在 Item, Comp Results data item 的左边下拉列表框中选择 By sequence num 选项，在右边下拉列表框中选择 LS, 选项，在下面的输入栏中输入 1，如图 6.33 所示。单击 OK 按钮关闭 Define Additional Element Table Items 对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Table Data 对话框。

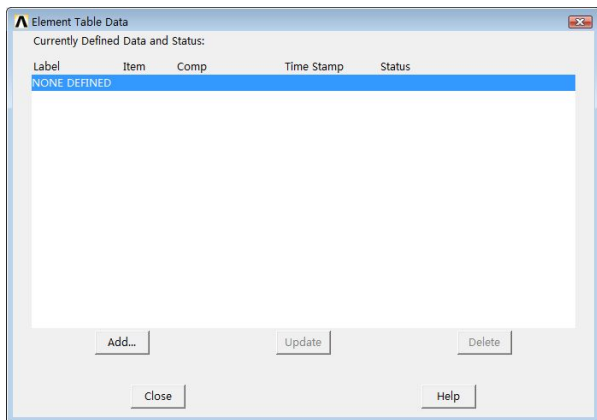


图 6.32 Element Table Data 对话框

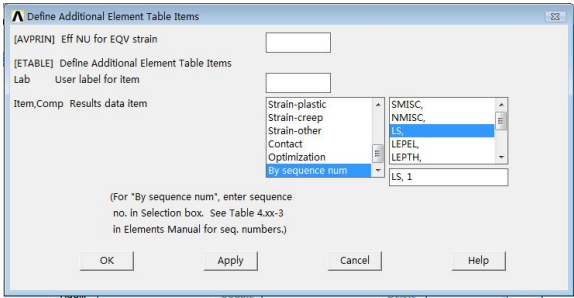


图 6.33 Define Additional Element Table Items 对话框



该操作为输出杆件单元的轴向应力结果，LINK1 单元的具体输出设置及参数含义可参考 6.2 节的相关内容或 ANSYS 程序的 LINK1 单元帮助文件。

step 4

选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→List Element Table 命令，弹出 List Element Table Data 对话框，在 Lab1-9 Items to be listed 列表框中选择 LS1 选项，如图 6.34 所示。单击 OK 按钮，弹出 PRETAB Command 列表框，如图 6.35 所示。从该列表框中可以看出，单元 1、5、9、13、14、15、16、18、19、25、27 的应力为零，即它们是零力杆。

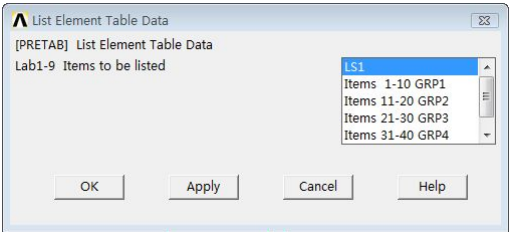


图 6.34 List Element Table Data 对话框

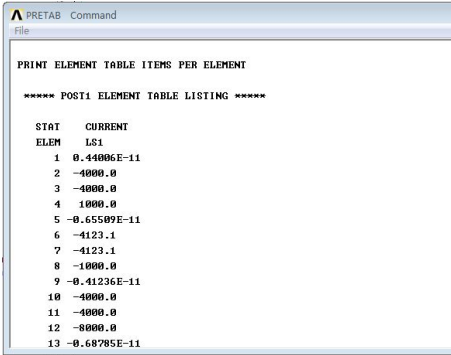


图 6.35 PRETAB Command 列表框

step 5

下面通过显示单元编号来观察零力杆的具体位置。选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering...命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，取消节点号显示，同时在 Elem/Attrib numbering 下拉列表框中选择 Element numbers 选项，单击 OK 按钮关闭该对话框，如图 6.36 所示。选择 Utility Menu→Plot→Elements 命令，ANSYS 窗口显示所有单元，结果如图 6.37 所示，从中可以清楚地看出零力杆所对应的位置。

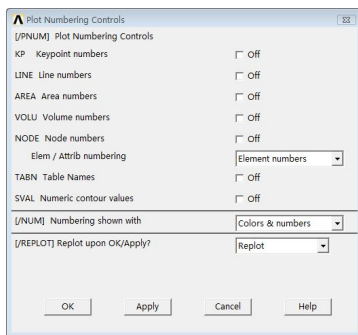


图 6.36 Plot Numbering Controls 对话框

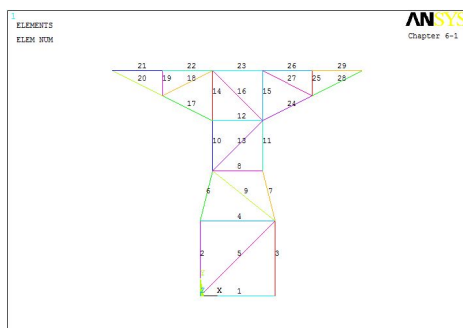


图 6.37 单元显示结果

step 6

也可以用等值线图形来显示零力杆的位置。选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Element Table**→**Plot Element Table** 命令，弹出 **Contour Plot of Element Table Data** 对话框，在 **Itlab Items to be plotted** 下拉列表框中选择 **LS1** 选项，如图 6.38 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。ANSYS 窗口显示结果如图 6.39 所示。

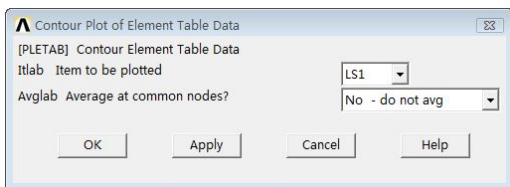


图 6.38 Contour Plot of Element Table Data 对话框

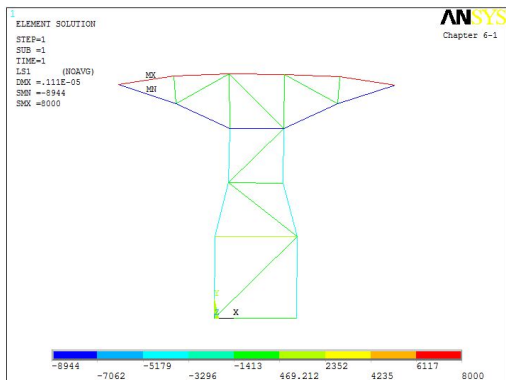


图 6.39 ANSYS 窗口显示结果

step 7

也可以通过绘图来显示零力杆位置。选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**

→Contour Plot→Line Elem Res 命令，弹出 Plot Line-Element Results 对话框，在 LabI Elem table item at node I 下拉列表框中选择 LS1 选项，在 LabJ Elem table item at node J 下拉列表框中也选择 LS1 选项，如图 6.40 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。ANSYS 窗口显示结果如图 6.41 所示。

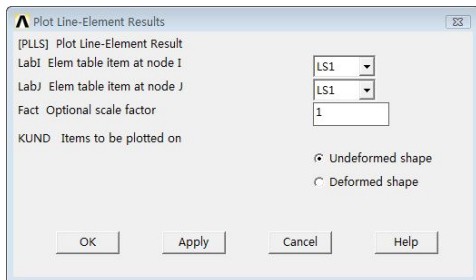


图 6.40 Plot Line-Element Results 对话框

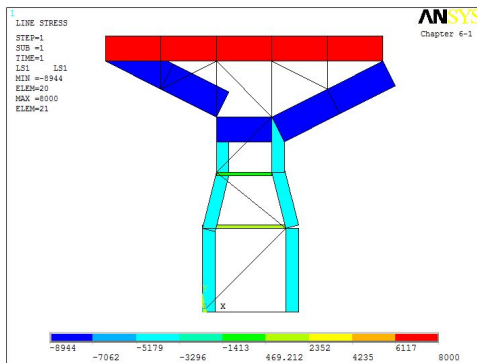


图 6.41 ANSYS 窗口显示结果

step 8

选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，如图 6.42 所示，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

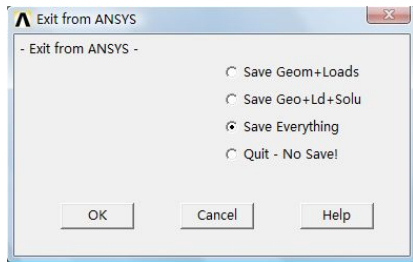


图 6.42 Exit from ANSYS 对话框

6.4 杆系结构有限元分析实例详解 2：立体桁架的静力分析

6.4.1 问题描述与分析

立体桁架结构如图 6.43 所示，每个网格的长宽高均为 0.4m，总长为 3.2m。结构支承方式为 一端固定一端悬臂。杆件采用空心钢管，截面尺寸为 $\Phi 16 \times 2.5 \text{ mm}^2$ ，弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，

泊松比为 0.3。立体桁架结构在如图 6.43 所示的节点位置承受集中力作用，大小为 1000N。试用 ANSYS 计算悬臂端下方两个节点的竖向位移和支座处的反作用力。

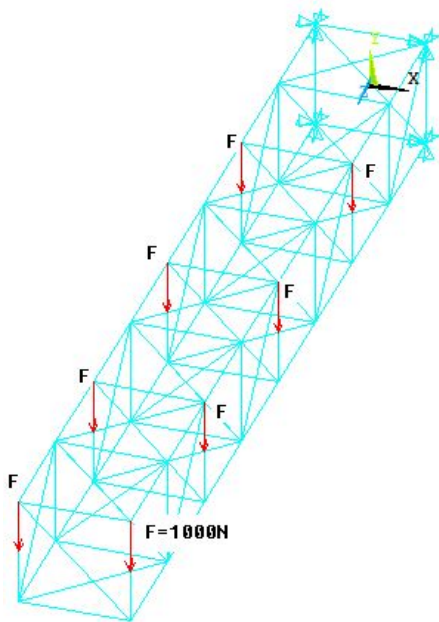


图 6.43 立体桁架结构

该模型比前一节的传输塔架结构模型相对复杂，此处采用建立正常有限元模型的方法进行操作，即建立关键点、线，划分网格，加载求解，结果后处理查看等。单元类型选择 LINK8 单元，单元长度为每个杆件的长度。

6.4.2 求解过程

6.4.2.1 定义工作目录及文件名

step 1

启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，如图 6.44 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 6\6-2，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter6-2。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

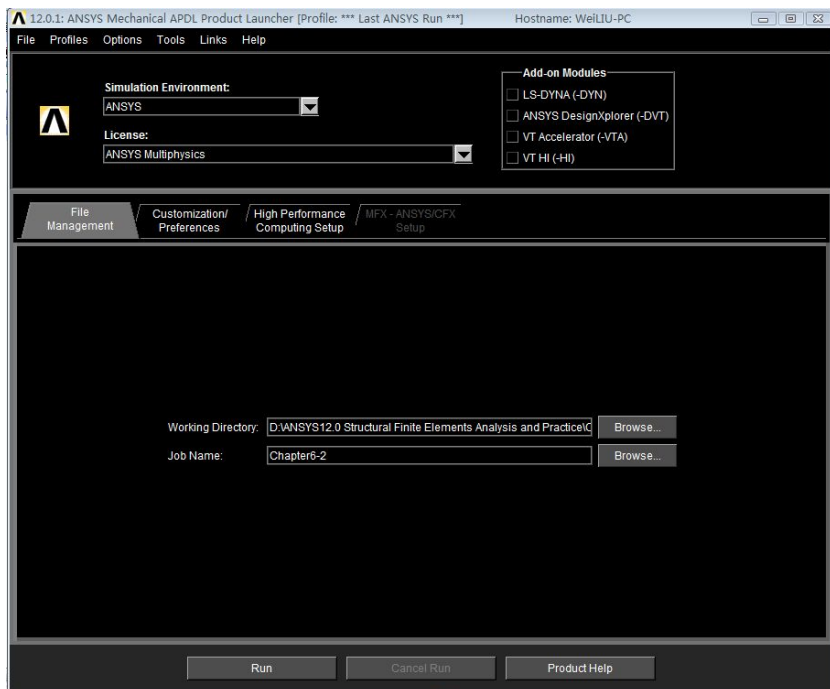


图 6.44 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口



可以先在目标文件位置建立工作目录，然后单击 Browse 按钮选择工作目录；也可以通过单击 Browse 按钮选择工作文件名。

6.4.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1

选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，如图 6.45 所示，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，如图 6.46 所示。单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link 中的 3D spar 8 单元，如图 6.47 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。



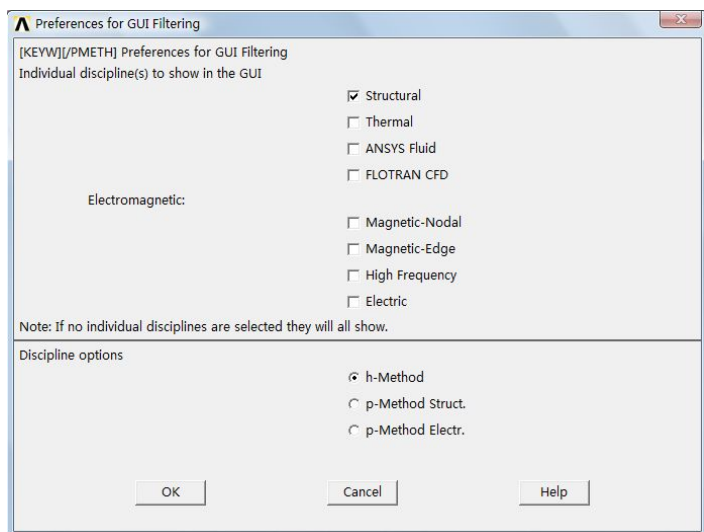


图 6.45 Preferences for GUI Filtering 对话框

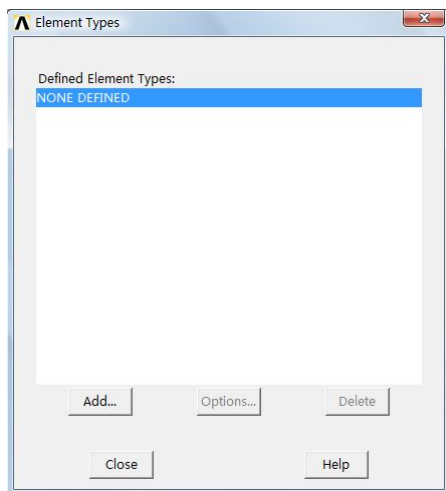


图 6.46 Element Types 对话框

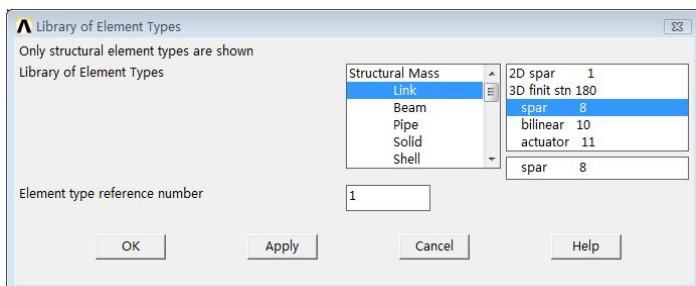


图 6.47 Library of Element Types 对话框

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，如图 6.48 所示，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框。在 EX 输入栏中输入 2.1×10^{11} ，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，

如图 6.49 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。在 **Define Material Model Behavior** 对话框上选择 **Material**→**Exit** 命令，关闭该对话框。

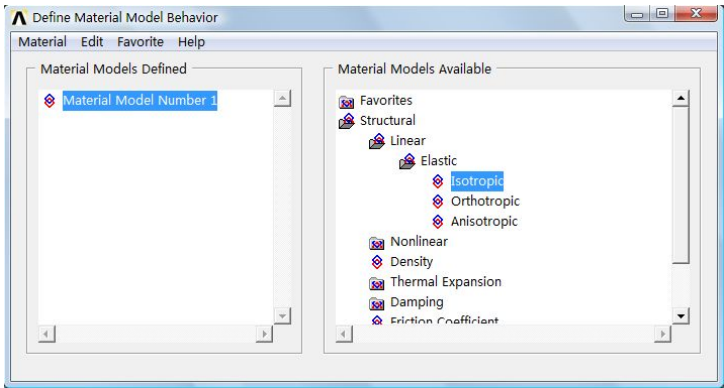


图 6.48 Define Material Model Behavior 对话框

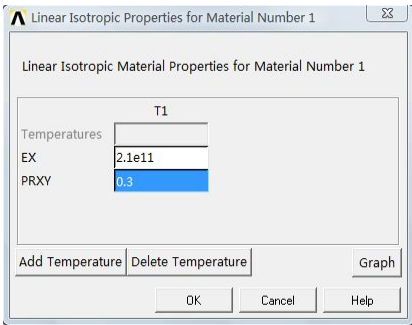


图 6.49 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 4 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Real Constants**→**Add/Edit/Delete** 命令，弹出 **Real Constants** 对话框，如图 6.50 所示，单击 **Add** 按钮，单击 **OK** 按钮，弹出 **Real Constant Set Number 1, for LINK8** 对话框。在 **Cross-sectional area AERA** 输入栏中输入 0.25，如图 6.51 所示。单击 **OK** 按钮关闭 **Real Constant Set Number 1, for LINK8** 对话框，单击 **Close** 按钮关闭 **Real Constants** 对话框。

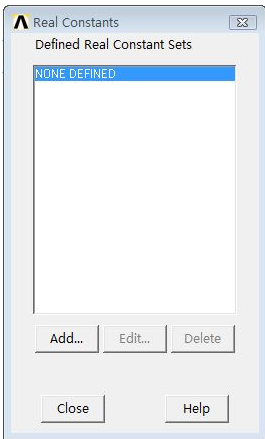


图 6.50 Real Constants 对话框

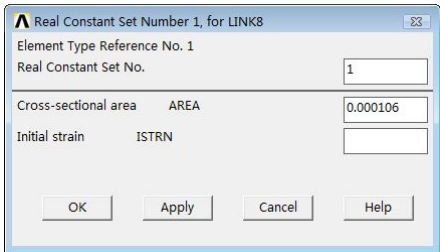


图 6.51 Real Constant Set Number 1, for LINK8 对话框

step 5 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。



也可单击 按钮或 SAVE_DB 按钮来实现保存操作。

6.4.2.3 创建几何模型

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 -0.2、0.2、3.2，如图 6.52 所示。单击 Apply 按钮建立关键点 1；然后在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 0.2、0.2、3.2，单击 Apply 按钮建立关键点 2；接着在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 0.2、-0.2、3.2，单击 Apply 按钮建立关键点 3；最后在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 -0.2、-0.2、3.2，单击 OK 按钮建立关键点 4。建立完 4 个关键点后的结果如图 6.53 所示。

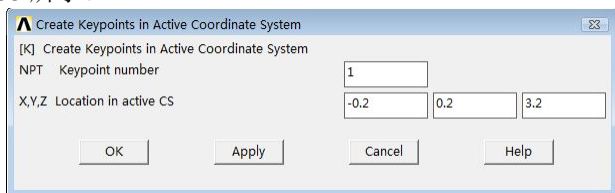


图 6.52 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

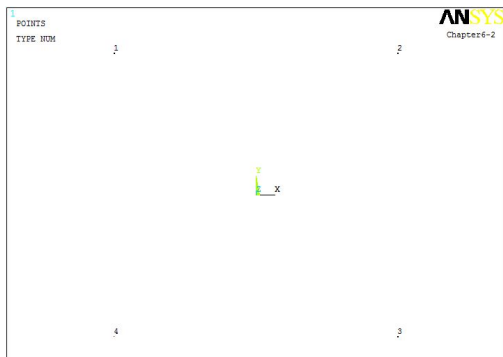


图 6.53 建立完 4 个关键点后的结果

step 2 复制关键点。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Keypoints 命令，弹出 Copy Keypoints 拾取菜单，如图 6.54 所示。单击 Pick All 按钮，弹出 Copy Keypoints 对话框，如图 6.55 所示。在 DZ Z-offset in active CS 输入栏中输入 -0.4，单击 Apply 按钮，此时关键点变为 8 个；然后再次单击 Copy Keypoints 拾取框上的 Pick All 按钮，在 Copy Keypoints 对话框中的 DZ Z-offset in active CS 输入栏中输入 -0.8，单击 Apply 按钮，此时关键点变为 16 个；接着再次单击 Copy Keypoints 拾取框上的 Pick All 按钮，在 Copy Keypoints 对话框中的 DZ Z-offset in active CS 输入栏中输入 -1.6，单击 Apply 按钮，此时关键点变为 32 个；最后，用鼠标单独选择关键点 1、2、3、4，此时会出现 Multiple_Entities 对话框，如图 6.56 所示，观察界面上的节点编号是否正确，如不正确，单击 Next 按钮或 Prev 按钮进行选择，然后单击 OK 按钮，4 个关键点全部选择后单击 Copy Keypoints

拾取框中的 OK 按钮，在 Copy Keypoints 对话框中的 DZ Z-offset in active CS 输入栏中输入-3.2，单击 OK 按钮，此时关键点变为 36 个，所有关键点建立完毕。

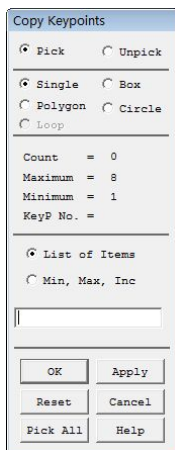


图 6.54 Copy Keypoints 拾取菜单

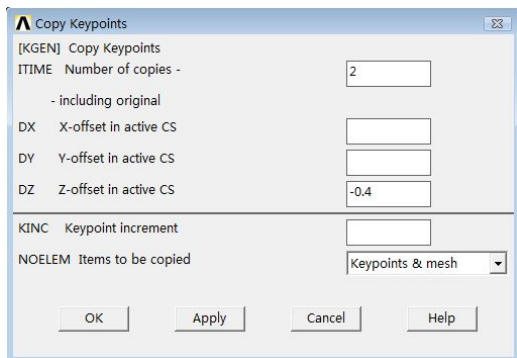


图 6.55 Copy Keypoints 对话框

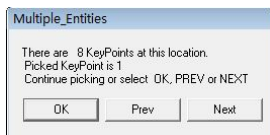


图 6.56 Multiple_Entities 对话框



本步骤利用 Copy Keypoints 命令快速地建立了所有的关键点，读者也可以按部就班地按照步骤 1 依次输入所有节点坐标来建立所有的关键点。

step 3

改变视图方向。选择 Utility Menu→PlotCtrls→View Setting→Viewing Direction 命令，弹出 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中分别输入 1、2、3，其余选项采用默认设置，如图 6.57 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。此时，ANSYS 显示窗口显示如图 6.58 所示的生成所有关键点后的结果。

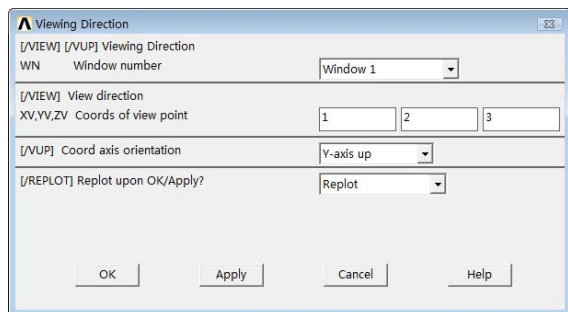


图 6.57 Viewing Direction 对话框

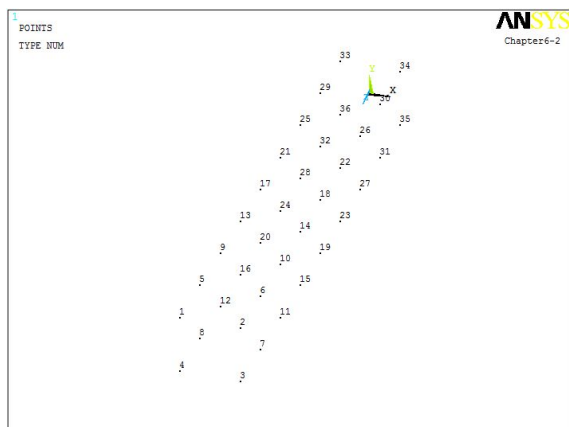



图 6.58 生成所有关键点后的结果



要改变视图，也可以通过单击快捷菜单中的  图标来完成。

step 4

如果屏幕上只显示关键点，而没有节点编号，可进行如下操作来显示关键点编号。选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，选中 **KP Keypoint numbers** 复选框，使其状态由 **Off** 变为 **On**，如图 6.59 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

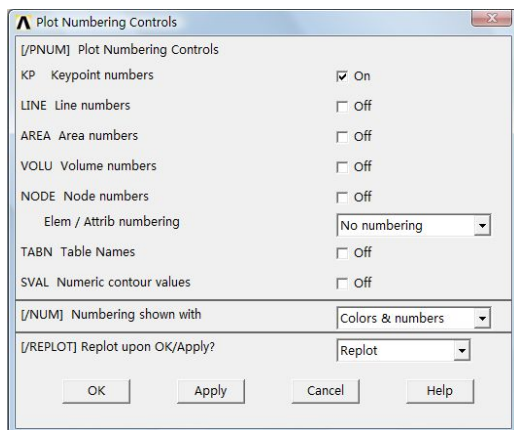


图 6.59 Plot Numbering Controls 对话框

step 5

连接关键点建立线。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Lines**→**Lines**→**Straight Line** 命令，弹出 **Create Straight Line** 拾取菜单，如图 6.60 所示。依次选择关键点 1, 2、关键点 2, 3、关键点 3, 4、关键点 4, 1、关键点 1, 3、关键点 1, 5、关键点 2, 6、关键点 3, 7、关键点 4, 8、关键点 2, 5、关键点 2, 7、关键点 4, 7 和关键点 4, 5，生成 13 条线；然后依次按照上述顺序生成其他所有的线，结果如图 6.61 所示。

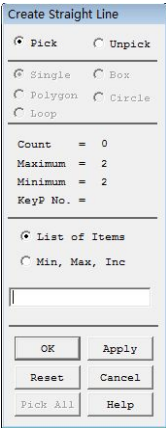


图 6.60 Create Straight Line 拾取菜单

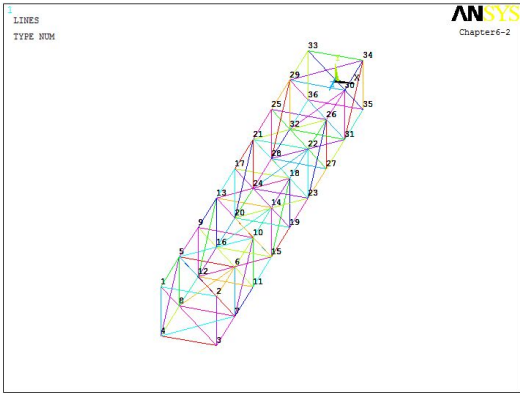


图 6.61 生成所有线的结果

step 6 至此，我们已经完成了立体桁架的有限元模型的建立，选择 **Utility Menu→File→Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

6.4.2.4 划分网格

step 1 选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All Lines** 命令，弹出 **Element Sizes on All Selected Lines** 对话框，在 **NDIV No. of element divisions** 输入栏中输入 1，即每条线分一个单元，如图 6.62 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines** 命令，弹出 **Mesh Lines** 拾取菜单，如图 6.63 所示，单击 **Pick All** 按钮关闭菜单。

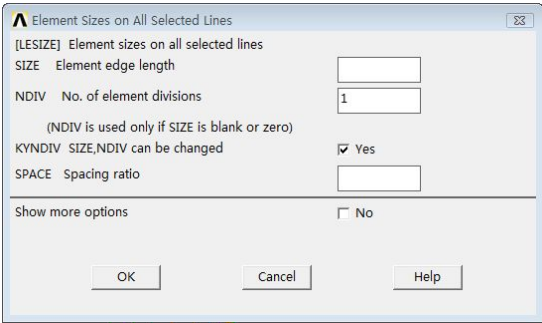


图 6.62 Element Sizes on All Selected Lines 对话框

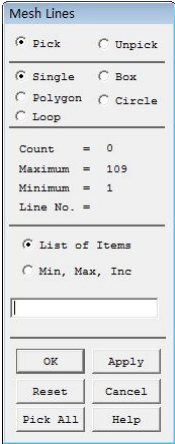


图 6.63 Mesh Lines 拾取菜单

step 3 选择 **Utility Menu→Plot→Elements** 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 6.64 所示的立体桁架单元划分结果，即有限元模型。

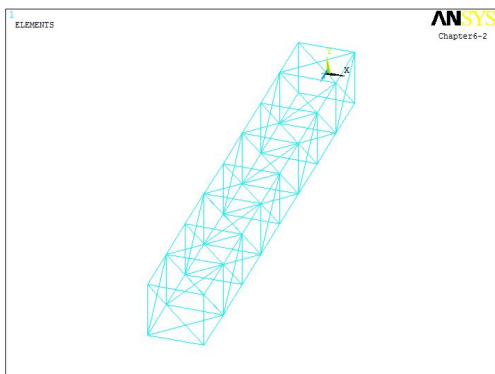


图 6.64 生成单元后的结果

step 4 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令,保存上述操作过程。选择 Main Menu→Finish 命令,退出前处理器。

6.4.2.5 加载求解

step 1 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints 命令,弹出 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单,如图 6.65 所示。用鼠标拾取关键点 33,34,35,36,单击 OK 按钮,弹出 Apply U,ROT on KPs 对话框,如图 6.66 所示,在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF 选项,单击 OK 按钮关闭该对话框,ANSYS 窗口将显示施加位移约束后的结果,如图 6.67 所示。



该操作是对 4 个节点进行固定位移约束,即完全限制 4 个节点在 3 个方向上的自由度。

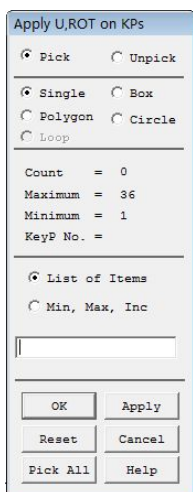


图 6.65 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单

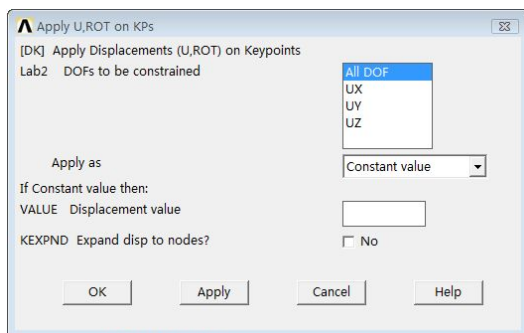


图 6.66 Apply U,ROT on KPs 对话框

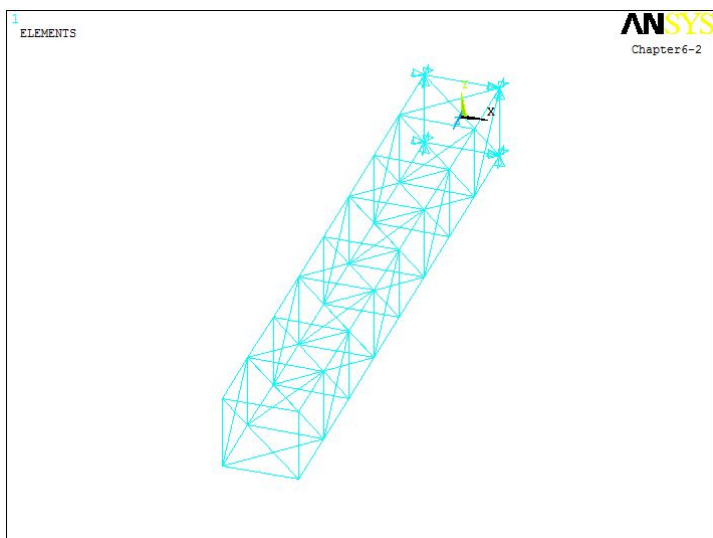


图 6.67 施加位移约束后的结果

step 2

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Keypoints 命令，弹出 Apply F/M on KPs 拾取菜单，如图 6.68 所示。用鼠标拾取关键点 1,2,9,10,17,18,25,26，单击 OK 按钮，弹出 Apply F/M on KPs 对话框。在 Lab Direction of force/mom 列表框中选择 FY 选项，在 VALUE Force/moment value 输入框中输入 -1000，如图 6.69 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 窗口显示施加载荷后的结果，如图 6.70 所示。



该操作是对立体桁架施加集中载荷，输入为负值，表示方向为 Y 轴负方向。

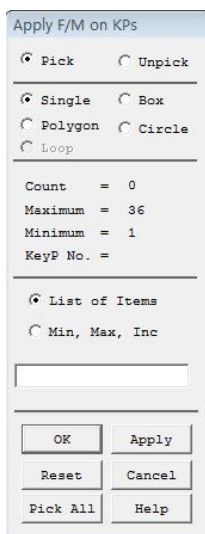


图 6.68 Apply F/M on KPs 拾取菜单

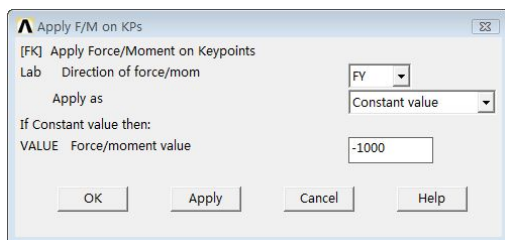


图 6.69 Apply F/M on KPs 对话框

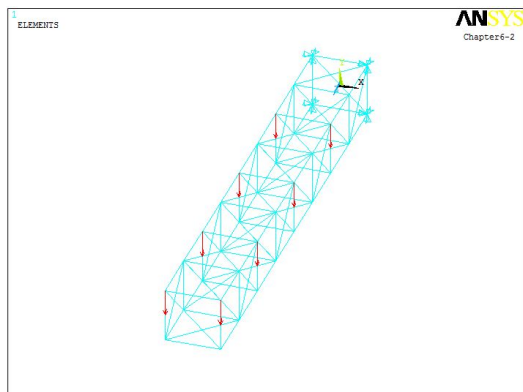


图 6.70 施加载荷后的结果

step 3 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Static**，如图 6.71 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 4 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**Current LS** 命令，弹出 **Solve Current Load Step** 对话框，如图 6.72 所示，单击 **OK** 按钮，ANSYS 开始求解计算。

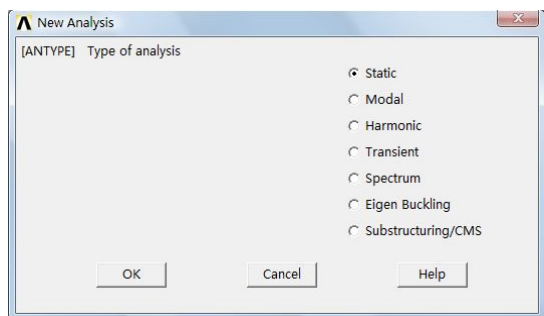


图 6.71 New Analysis 对话框

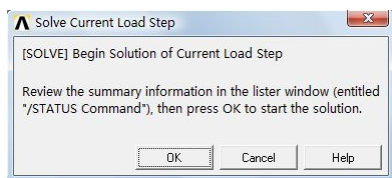


图 6.72 Solve Current Load Step 对话框

框

step 5 求解结束时，出现 **Note** 对话框，如图 6.73 所示，单击 **Close** 按钮关闭该对话框。

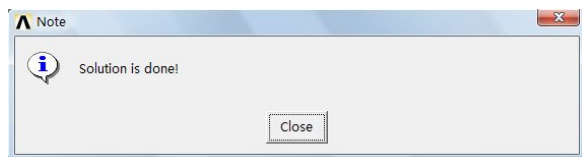


图 6.73 Note 对话框

step 6 选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。至此，加载及求解过程结束，下面开始查看和分析结果。

6.4.2.6 查看求解结果

step 1 查看结构整体变形。选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Deformed Shape** 命令，弹出 **Plot Deformed Shape** 对话框，在 **KUND Items to be plotted** 栏中选择 **Def + undeformed** 单选按钮，如图 6.74 所示。单击 **OK** 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 6.75 所示。

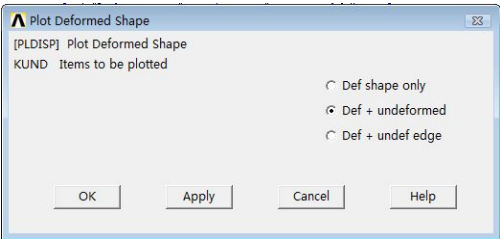


图 6.74 Plot Deformed Shape 对话框

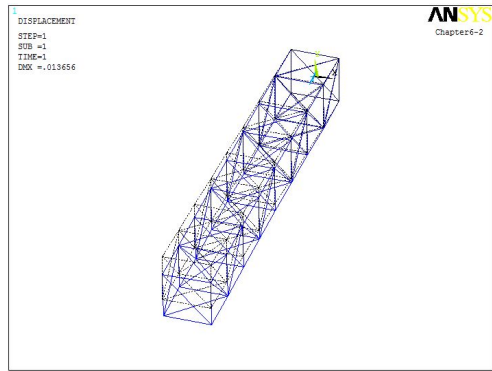


图 6.75 变形后的几何形状和未变形的几何形状

step 2 查看节点 3,4 的竖向位移。选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution 命令,弹出 List Nodal Solution 对话框,选择竖向位移列表输出,即 Y-Component of displacement, 如图 6.76 所示,单击 OK 按钮,出现节点位移结果列表,如图 6.77 所示,从中可以清楚地看出节点 3,4 的竖向位移为-0.013599m。

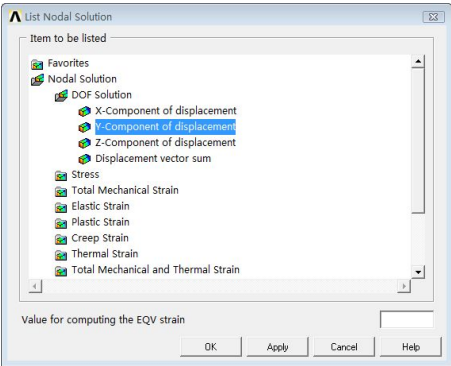


图 6.76 List Nodal Solution 对话框

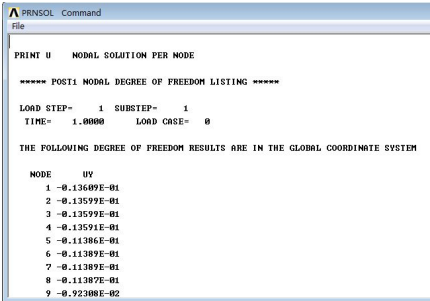


图 6.77 节点在 Y 方向上的位移结果列表

step 3

查看结构支座反力。选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**List Results**→**Reaction Solu** 命令，弹出 **List Reaction Solution** 对话框，在 **Lab Item to be listed** 列表框中选择 **All struc force F** 选项，如图 6.78 所示，单击 **OK** 按钮，出现支座节点反作用力结果列表，如图 6.79 所示。

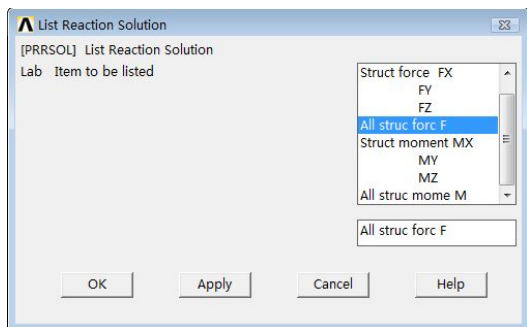


图 6.78 List Reaction Solution 对话框

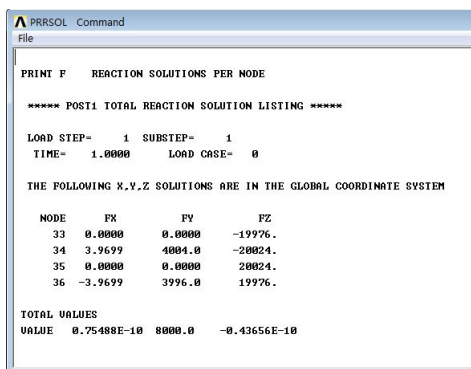


图 6.79 支座节点反作用力结果列表



也可以像上节的传输塔架实例一样输出各个杆件的轴力，即采用 **ETABLE** 和 **ESOL** 命令输出结果，操作过程及输出项设置相同，此处不再赘述。

step 4

选择 **Utility Menu**→**File**→**Exit** 命令，弹出 **Exit from ANSYS** 对话框，选择 **Save Everything** 单选按钮，如图 6.80 所示，单击 **OK** 按钮，关闭 ANSYS 程序。

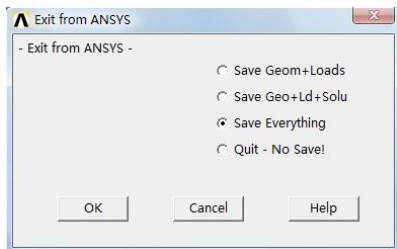


图 6.80 Exit from ANSYS 对话框

6.4.3 命令流

/prep7 !进入前处理



```
! 定义关键点
*do, i, 1, 33, 4
k, i, -0.4/2, 0.4/2, 8*0.4-(i-1)/4*0.4
k, i+1, 0.4/2, 0.4/2, 8*0.4-(i-1)/4*0.4
k, i+2, 0.4/2, -0.4/2, 8*0.4-(i-1)/4*0.4
k, i+3, -0.4/2, -0.4/2, 8*0.4-(i-1)/4*0.4
*enddo
! 定义关键点
```

```
! 连线
L, 1, 2
L, 2, 3
L, 3, 4
L, 4, 1
L, 1, 3
L, 1, 5
L, 2, 6
L, 3, 7
L, 4, 8
L, 2, 5
L, 2, 7
L, 4, 7
L, 4, 5
L, 5, 6
L, 6, 7
L, 7, 8
L, 8, 5
L, 8, 6
L, 5, 9
L, 6, 10
L, 7, 11
L, 8, 12
L, 5, 10
L, 7, 10
L, 7, 12
L, 5, 12
L, 9, 10
L, 10, 11
L, 11, 12
L, 12, 9
L, 9, 11
L, 9, 13
L, 10, 14
L, 11, 15
L, 12, 16
L, 10, 13
L, 10, 15
L, 15, 12
```



L, 12, 13
L, 13, 14
L, 14, 15
L, 15, 16
L, 13, 16
L, 16, 14
L, 13, 17
L, 14, 18
L, 15, 19
L, 16, 20
L, 13, 18
L, 18, 15
L, 15, 20
L, 13, 20
L, 17, 18
L, 18, 19
L, 19, 20
L, 20, 17
L, 17, 19
L, 17, 21
L, 18, 22
L, 19, 23
L, 20, 24
L, 18, 21
L, 18, 23
L, 23, 20
L, 20, 21
L, 21, 22
L, 22, 23
L, 23, 24
L, 21, 24
L, 24, 22
L, 21, 25
L, 22, 26
L, 23, 27
L, 24, 28
L, 21, 26
L, 26, 23
L, 23, 28
L, 21, 28
L, 25, 26
L, 26, 27
L, 27, 28
L, 25, 28
L, 25, 27
L, 25, 29
L, 26, 30
L, 27, 31
L, 28, 32
L, 26, 29
L, 26, 31

```
L, 31, 28
L, 29, 28
L, 29, 30
L, 30, 31
L, 31, 32
L, 29, 32
L, 32, 30
L, 29, 33
L, 30, 34
L, 31, 35
L, 32, 36
L, 29, 34
L, 34, 31
L, 31, 36
L, 29, 36
L, 33, 34
L, 34, 35
L, 35, 36
L, 33, 36
L, 35, 33
! 连线

! 定义单元类型, 材料属性
ET,1,LINK8

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e11
MPDATA,PRXY,1,,0.3

R,1,0.000106,,
! 定义单元类型, 材料属性

! 划分单元
LESIZE,ALL, , ,1, ,1, , ,1,

LSEL,all, , , , , ,

LMESH,all, ,
! 划分单元

! 加载求解
FINISH
/SOL

DK,33,all, , , , , ,
DK,34,all, , , , , ,
DK,35,all, , , , , ,
```

```
DK,36,all,, , , , ,
```

```
FK,1,FY,-1000  
FK,2,FY,-1000  
FK,9,FY,-1000  
FK,10,FY,-1000  
FK,17,FY,-1000  
FK,18,FY,-1000  
FK,25,FY,-1000  
FK,26,FY,-1000
```

```
ANTYPE,0
```

```
SOLVE  
FINISH  
! 加载求解
```

```
! 结果查看  
/POST1
```

```
PLDISP,1
```

```
PRNSOL,U,Y
```

```
PRRSOL,F  
! 结果查看
```

```
FINISH  
! /EXIT,ALL
```

6.5 小结

本章重点阐述了杆系结构的有限元分析方法，并给出了 ANSYS 程序中常用的杆单元特性，最后以两个实际工程案例详细介绍了应用 ANSYS 程序进行杆系结构分析的技巧和结果查看中的输出项目设置。



第 7 章 ANSYS 梁系结构有限元分析

本章包括

- ◆ 梁系结构有限元分析基本过程
- ◆ ANSYS 中提供的梁单元简介
- ◆ 实例详解 1：多跨连续梁静力分析
- ◆ 实例详解 2：门式钢架静力分析

上一章我们阐述了杆系结构的基本概念，其中包括一种节点为刚节点的杆系结构，在刚节点上，各杆件之间的夹角保持不变，刚节点能传递力矩。我们称这样的结构为梁系结构，它们在建筑、桥梁、机械、航空、航天、船舶、海洋、水利等工程中应用更广泛，如桥梁、平面刚架、平面框架、井字楼盖、空间框架、空间钢架、网壳等结构。

对于梁系结构，已经存在很多成熟的方法，可对其进行结构设计和分析，但到目前为止，有限元方法仍是最有效、最快捷的方法之一。本章主要讨论节点为刚节点的杆系结构，即梁系结构，介绍在 ANSYS 中进行桥梁和钢架结构有限元分析的基本方法，同时结合工程实例进行详解。空间梁系结构的实例请参见第 15 章的相关内容。

7.1 梁系结构有限元分析基本过程

梁系结构也属于自然离散结构体系，因此其有限元分析过程与桁架结构（杆系结构）相似，也包括单元分析、结构分析、引入边界条件并求解等步骤。对于平面梁单元，在计算其轴向变形时，每个节点将有轴向位移、横向位移和弯曲转角 3 个位移分量，以及轴力、剪力和弯矩 3 个杆端力（矩）分量，因此其单元刚度矩阵应为一个 6×6 矩阵。对于一般情况下的空间梁单元，其一个节点将具有 6 个运动自由度，包括 3 个线位移自由度及 3 个转动自由度。其中，线位移自由度包括 1 个轴向位移及 2 个平面内外的横向位移，转动自由度包括 1 个扭转角和 2 个弯曲转角自由度。一个节点具有 6 个杆端力（矩）分量，即 3 个杆端力分量和 3 个杆端力矩分量，因此，其单元刚度矩阵应是一个 12×12 矩阵。下面以平面梁系结构为例，阐述梁系结构有限元分析的基本过程：

7.1.1 基本假定

1. 平面梁系结构的节点假设为刚接，每一个节点有 3 个自由度，即 X、Y 位移方向的平动自由度和绕 Z 轴方向的转动自由度。
2. 杆件不仅承受轴向的拉力和压力，还承受弯矩作用。

7.1.2 单元刚度矩阵

7.1.2.1 局部坐标系单刚矩阵

如前所述,平面梁系结构的每个单元都是一个杆件,两端各有一个节点,在平面内有 6 个节点位移分量,即 6 个自由度。取局部坐标系的 \mathbf{x}' 轴沿杆长方向, \mathbf{y}' 轴方向垂直于 \mathbf{x}' 轴。在局部坐标系中,由材料力学的知识可知,轴向位移 Δ 只与轴向力 T 有关,弯曲位移 f 、 θ'_i 只与切向力 q 、 m 有关。在小变形情况下,杆件的轴向变形与弯曲变形两者互不相关。为分析单元位移与受力的关系,可分别建立两者的单元刚度矩阵,然后再进行合并,结果如下:

$$\begin{Bmatrix} T_i \\ q_i \\ m_i \\ \dots \\ T_j \\ q_j \\ m_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & \vdots & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EA}{l^3} & \frac{6EJ}{l^2} & \vdots & 0 & -\frac{12EJ}{l^3} & \frac{6EJ}{l^2} \\ 0 & \frac{6EJ}{l^2} & \frac{4EJ}{l} & \vdots & 0 & -\frac{6EJ}{l^2} & \frac{2EJ}{l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \vdots & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EJ}{l^3} & -\frac{6EJ}{l^2} & \vdots & 0 & \frac{12EJ}{l^3} & -\frac{6EJ}{l^2} \\ 0 & \frac{6EJ}{l^2} & \frac{2EJ}{l} & \vdots & 0 & -\frac{6EJ}{l^2} & \frac{4EJ}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_i \\ f_i \\ \theta'_i \\ \dots \\ \Delta_j \\ f_j \\ \theta'_j \end{Bmatrix} \quad (7-1)$$

或简写为:

$$\{p'\}^e = [K']^e [\delta']^e \quad (7-2)$$

可见,如前所述,平面梁系结构杆件单元对局部坐标系的单元刚度矩阵 $[K']^e$ 为 6×6 方矩阵,且是对称的。

7.1.2.2 坐标变换

对梁系结构中的所有杆件都可建立局部坐标系单刚矩阵方程。由于杆件的位置不同,各杆的 \bar{x} 轴方向也不同,各杆件内力和位移不易叠加,故应采用统一坐标系,即结构总体坐标系,通常采用 x, y, z 直角坐标系。

局部坐标系中的位移 $\{\delta'_i\} = [\Delta_i \ f_i \ \theta'_i]^T$ 与整体统一坐标系中的位移 $\{\delta_i\} = [\mu_i \ \nu_i \ \theta_i]^T$ 的几何变换关系可写成矩阵形式:

$$\begin{Bmatrix} \Delta_i \\ f_i \\ \theta'_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mu_i \\ \nu_i \\ \theta_i \end{Bmatrix}$$

(7-3)



或简写为：

$$\{\delta'_i\}^e = [\lambda] \{\delta_i\}$$

(7-4)

一个梁系杆件单元有两个节点 i, j ，将两个节点的位移关系写在一起：

$$\begin{Bmatrix} \delta'_i \\ \delta'_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} \tag{7-5}$$

简写为：

$$\{\delta'\}^e = [T^e] \{\delta\}^e \tag{7-6}$$

其中， $[T^e]$ 为坐标变换矩阵。

同理，单元的节点力亦有相同的变换关系，即：

$$\{p'\}^e = [T^e] \{p\}^e \tag{7-7}$$

7.1.2.3 杆件整体坐标系的单刚矩阵

将式(7-6)和式(7-7)代入式(7-2)中，同时将上式两端各左乘 $[T^e]$ 的逆矩阵 $[T^e]^{-1}$ ，并注意到 $[T^e]^{-1} = [T^e]^T$ ，得：

$$\{p\}^e = [T^e]^{-1} [k']^e [T^e] \{\delta\}^e = [k]^e \{\delta\}^e \tag{7-8}$$

式中， $[k]^e = [T^e]^{-1} [k']^e [T^e]$ 为杆件 ij 在整体坐标系中的单刚矩阵，是一个 6×6 阶的矩阵。

7.1.3 结构总体刚度矩阵

建立了杆件整体坐标系的单刚矩阵之后，要进一步建立结构的总刚矩阵。在建立总刚矩阵时，应满足两个条件，即 (1) 变形协调条件；(2) 节点内外力平衡条件。根据这两个条件，可将单刚矩阵的子矩阵的行列编号（即节点号）“对号入座”，形成总刚矩阵。对于梁系结构中的所有节点，逐点列出内外力平衡方程，联合起来就形成了结构刚度矩阵方程，其表达式为：

$$[K] \{\delta\} = \{Q\} \tag{7-9}$$

式中, $[K] = \sum_{e=1}^m [k]^e$ 是结构总刚度矩阵, 是 $3n \times 3n$ 方阵。

7.1.4 边界条件及求解

结构总刚度矩阵 $[K]$ 是奇异的, 尚需引入边界条件以消除刚体位移, 使总刚度矩阵为正定矩阵。边界条件中有固定、弹性约束和强迫位移等。在给定的边界条件下, 即可求得各节点位移, 进而计算各杆件的内力和应力。该过程在相关有限元书籍中均有阐述, 故此处不再赘述。

7.1.5 空间梁系结构的单元刚度矩阵及坐标变换矩阵

对于一般情况下的空间梁单元, 其一个节点具有 6 个自由度, 包括 3 个线位移和 3 个角位移。为方便读者分析, 现给出空间梁单元在局部坐标系下的刚度矩阵:

$$K^e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l^e} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l^e} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^{e3}} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^{e2}} & 0 & -\frac{12EI_z}{l^{e3}} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^{e2}} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^{e3}} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^{e2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^{e3}} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^{e2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l^e} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l^e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^{e2}} & 0 & \frac{4EI_y}{l^e} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^{e2}} & 0 & \frac{2EI_y}{l^e} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{l^{e2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l^e} & 0 & -\frac{6EI_z}{l^{e2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l^e} \\ -\frac{EA}{l^e} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l^e} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{l^{e3}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^{e2}} & 0 & \frac{12EI_z}{l^{e3}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^{e2}} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^{e3}} & 0 & \frac{6EI_y}{l^{e2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^{e3}} & 0 & \frac{6EI_y}{l^{e2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l^e} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l^e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^{e2}} & 0 & \frac{2EI_y}{l^e} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^{e2}} & 0 & \frac{4EI_y}{l^e} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{l^{e2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{l^e} & 0 & -\frac{6EI_z}{l^{e2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l^e} \end{bmatrix} \quad (7-10)$$

单元坐标变换矩阵如下:

$$T_{(12 \times 12)} = \begin{bmatrix} \lambda_{(3 \times 3)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{(3 \times 3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{(3 \times 3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{(3 \times 3)} \end{bmatrix} \quad (7-11)$$

其中, $\lambda_{(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} \cos(x, \bar{x}) & \cos(x, \bar{y}) & \cos(x, \bar{z}) \\ \cos(y, \bar{x}) & \cos(y, \bar{y}) & \cos(y, \bar{z}) \\ \cos(z, \bar{x}) & \cos(z, \bar{y}) & \cos(z, \bar{z}) \end{bmatrix}$ 为局部坐标系相对于总体统一坐标系的方向余弦矩阵。

7.2 ANSYS 中提供的梁单元简介

ANSYS 程序中提供了多种梁单元, 用来模拟不同场合的应用, 可将其分为平面梁单元和空间梁单元, 如应用于平面梁及平面钢架的 **BEAM3** (弹性)、**BEAM23** (塑性)、**BEAM54** (弹性非对称变截面) 二维梁单元, 应用于空间梁、空间钢架、空间框架的 **BEAM4** (弹性)、**BEAM24** (塑性)、**BEAM44** (弹性非对称变截面)、**BEAM188** (线性有限应变梁单元)、**BEAM189** (二次有限应变梁单元) 三维梁单元等。本节重点介绍梁系结构中最常用的 4 种梁单元类型, 分别是 **BEAM3**、**BEAM4**、**BEAM188** 和 **BEAM189** 单元。

7.2.1 BEAM3 单元特性简介

BEAM3 单元是一种可承受拉、压、弯作用的单轴单元。该单元的每个节点有 3 个自由度, 即沿 x 、 y 方向的线位移及绕 z 轴的角位移。利用 **BEAM3** 单元可以模拟平面梁、平面钢架等平面梁系结构。**BEAM3** 单元的几何模型如图 7.1 所示, 图中给出了单元的几何图形、节点位置及坐标系。单元由两个节点、横截面面积、横截面惯性矩、截面高度及材料属性来定义。初始应变通过 Δ/L 给定, Δ 为单元长度 L (由 I、J 节点坐标算得) 与 0 应变单元长度之差。

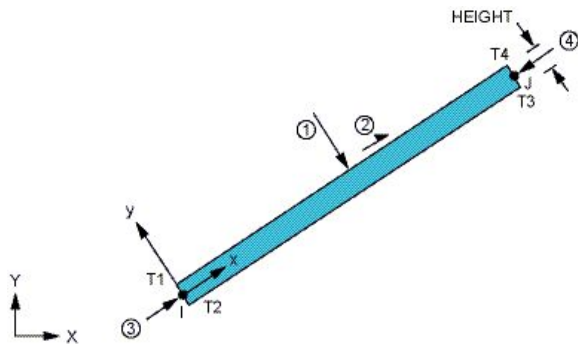


图 7.1 BEAM3 的几何模型

该单元在具体应用过程中存在如下假设和注意事项。

- ◆ 梁单元必须位于 X - Y 平面内, 长度及面积均不可为 0。
- ◆ 惯性矩参数可以是任意形状横截面的计算结果。但对任何形状截面的梁, 其等效高度必须先行确定, 因为计算弯曲应力时, 将取中性轴至最外边的距离为高度的一半。
- ◆ 单元高度仅在弯曲计算和热应力分析时才会用到, 应力沿着截面高度方向线性分布。
- ◆ 作用的温度梯度假定沿长度方向及高度方向线性变化。
- ◆ 在不使用大变形时, 惯性矩可以为 0。

BEAM3 单元的输入参数总结如表 7.1 所示，更多输入信息可参阅 ANSYS 自带的帮助文件。单元可在实常数 ADDMAS 中输入单位长度的附加质量。可以在本单元的表面施加面载荷，如图 7.1 中的带圈数字所示，其中，箭头指向为面载荷作用正向。KEYOPT（10）用来控制线性变化的横向压力相对单元节点的偏移量。可在单元几何图形的 4 个角上设定温度值，它被当做体载荷处理。第一个角上的温度 T1 的默认值为 TUNIF，如果其他角的温度未给定，则其默认值等于第一个角的温度；如果给定了 T1 和 T2，则 T3 的默认值为 T2，T4 的默认值为 T1。KEYOPT（9）用来控制两节点中间部分相关值的输出情况，值是按平衡条件得出的。

表 7.1 BEAM3 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	BEAM3
节点	I, J
自由度	UX, UY, ROTZ
实常数	AREA, IZZ, HEIGHT, SHEARZ, ISTRN, ADDMAS
材料特性	EX, ALPX, DENS, GXY, DAMP
表面载荷	压力—— face 1 (I-J) (-Y 法线方向) face 2 (I-J) (+X 切线方向) face 3 (I) (+X 轴向) face 4 (J) (-X 轴向) (负值表示与图标方向相反)
体载荷	温度——T1, T2, T3, T4
特性	应力强化、大变形，单元生、死
KEYOPT（6）	力和力矩输出控制变量 0——不输出力和力矩 1——在单元坐标系中输出力和力矩
KEYOPT（9）	用于控制该单元节点 I, J 其他数据的输出 N——输出 N 个中间位置数据（N = 0, 1, 3, 5, 7, 9）
KEYOPT（10）	用于 SFBEAM 指令时线性变化的表面负载 0——以长度为单位，负载相对于 I, J 节点的偏移量 1——以长度为单位（0.0 to 1.0），负载相对于 I, J 节点的偏移量

注：若 SHEARZ=0，则单元在 Y 方向上无剪切变形。

BEAM3 单元的输出图如图 7.2 所示，求解输出的节点位移包含在全部节点解中，其他输出信息如表 7.2 所示，其中第一列给出了各输出项的名称，用命令 ETABLE（POST1）及 ESOL（POST26）可定义这些变量，用于查询；第二列是具体的含义；第三列表示某一变量值是否在输出文件中给出；第四列表示某一变量值是否在结果文件中给出。在第三列和第四列中，“Y”表示可以输出，具体数值则表示在满足特定条件时才输出，而“—”则表示不输出。

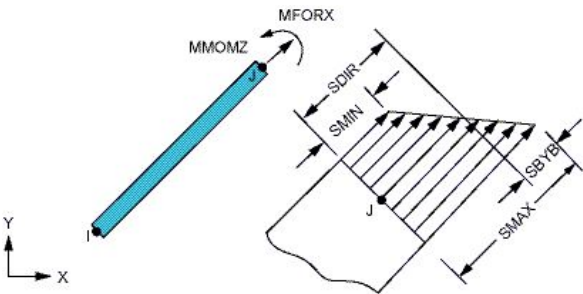


图 7.2 BEAM3 单元输出图

表 7.2 BEAM3 单元的输出数据定义列表

名称	定义	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	单元节点 I, J	Y	Y
MAT	单元材料号	Y	Y
VOLU:	单元体积	N	Y
XC, YC	输出结果坐标	Y	3
TEMP	温度 T1, T2, T3, T4	Y	Y
PRES	压力 P1 在节点 I, J; 偏移量 1 在 I, J; 压力 P2 在 I, J; 偏移量 2 在 I, J; 压力 P3 在 I; 压力 P4 在 J	Y	Y
SDIR	轴向直接应力	1	1
SBYT	梁内单元+Y 面上的弯曲应力	1	1
SBYB	梁内单元-Y 面上的弯曲应力	1	1
SMAX	最大应力（直接应力+弯曲应力）	1	1
SMIN	最小应力（直接应力-弯曲应力）	1	1
EPELDIR	端部轴向弹性应变	1	1
EPELBYT	梁内单元+Y 面上的弯曲弹性应变	1	1
EPELBYB	梁内单元-Y 面上的弯曲弹性应变	1	1
EPTHDIR	端点轴向热应变	1	1
EPTHBYT	梁内单元+Y 面上的弯曲热应变	1	1
EPTHBYB	梁内单元-Y 面上的弯曲热应变	1	1
EPINAXL	单元初始轴向应变	1	1
MFOR(X, Y)	单元坐标系中 X, Y 方向的力	2	Y
MMOMZ	单元坐标系中 Z 方向的弯矩	2	Y

注:

1. 每个单元的节点 I, J 及中间点（见 KEYOPT(9)）均列出该项结果。
2. 如果 KEYOPT(6) = 1, 则仅在几何中心作*GET 的一个项目可用。

BEAM3 单元 KEYOPT(9)=0 时的项目和顺序号列表如表 7.3 所示，该表列出了在后处理中可通过 ETABLE 命令加参数及数字顺序号的方法定义可列表查看的有关变量的细则。其中，顺序号是单元数据为常数或单值时对应的序号。KEYOPT(9)=1、3、5、7、9 时的用于 ETABLE 和 ESOL 命令的输出项和顺序号列表请参见帮助文件。

表 7.3 BEAM3 单元的用于 ETABLE 和 ESOL 命令的输出项和顺序号列表 (KEYOPT (9)=0)

变量名（名称对应表 7.2）		ETABLE 和 ESOL 命令输出项			
		输出项	顺序号	I	J
SDIR（轴向直接应力）		LS	—	1	4
SBYT（梁内单元+Y 面上的弯曲应力）		LS	—	2	5
SBYB（梁内单元-Y 面上的弯曲应力）		LS	—	3	6
EPELDIR（端部轴向弹性应变）		LEPEL	—	1	4
(续表)					
变量名（名称对应表 7.2）		ETABLE 和 ESOL 命令输入项			
		输出项	顺序号	I	J
EPELBYT（梁内单元+Y 面上的弯曲弹性应变）		LEPEL	—	2	5
EPELBYB（梁内单元-Y 面上的弯曲弹性应变）		LEPEL	—	3	6
EPTHDIR（端点轴向热应变）		LEPTH	—	1	4
EPTHBYT（梁内单元+Y 面上的弯曲热应变）		LEPTH	—	2	5
EPTHBYB（梁内单元-Y 面上的弯曲热应变）		LEPTH	—	3	6
EPINAXL（单元初始轴向应变）		LEPTH	7	—	—
SMAX（最大应力（直接应力+弯曲应力））		NMISC	—	1	3
SMIN（最小应力（直接应力-弯曲应力））		NMISC	—	2	4
MFORX（单元坐标系中 X 方向的力）		SMISC	—	1	7
MFORY（单元坐标系中 Y 方向的力）		SMISC	—	2	8
MMOMZ（单元坐标系中 Z 方向的弯矩）		SMISC	—	6	12
P1（压力 1 在节点 I, J 间）		SMISC	—	13	14
OFFST1（压力 1 距节点偏移量）		SMISC	—	15	16
P2（压力 2 在节点 I, J 间）		SMISC	—	17	18
OFFST2（压力 2 距节点偏移量）		SMISC	—	19	20
P3（压力 3）		SMISC	—	21	—
P4（压力 4）		SMISC	—	—	22
		Pseudo Node（伪节点）			
		1	2	3	4
TEMP（温度）	LBFE	1	2	3	4

7.2.2 BEAM4 单元特性简介

BEAM4 单元是一种可用于承受拉、压、弯、扭的单轴受力单元。这种单元在每个节点上有 6 个自由度：x、y、z 3 个方向的线位移和绕 x、y、z 3 个轴的角位移。它被广泛地应用于空间刚架、框架等空间梁柱结构中。BEAM4 单元的几何模型如图 7.3 所示，图中给出了单元的几何图形、节点位置及坐标系统。单元的 X 轴方向是指从 I 节点到 J 节点的方向。如果只给了两个节点参数，那单元 Y 轴的方向自动确定为平行于系统坐标系下的 X-Y 平面，具体如图 7.3 所示。当单元坐标的 X 轴平行于整体坐标系下的 Z 轴（偏差在 0.01% 以内）时，单元 Y 轴的方向平行于总体坐标系下的 Y

轴。用户也可以通过给定 θ 角或定义第 3 个节点 **K** 的方法来控制单元的方向。如果前面的两个参数同时给定，则以给定的第 3 个节点控制为准。第 3 个节点一旦给出就意味着定义了一个由 **I**, **J**, **K** 3 点定义的平面且该平面包含了单元坐标的 **X** 轴与 **Z** 轴。若该单元用于大变形分析，那么给定的第 3 个节点 (**K**) 或旋转角 (θ) 仅能用来确定单元的初始状态。剪切变形常数 (**SHARZ** 和 **SHEARY**) 只有当考虑剪切变形时才设定，该值为 0 时表示忽略了剪切变形。

BEAM4 在具体应用时，存在如下假设和注意事项。

- ◆ 梁单元必须位于 **X-Y** 平面内，长度及面积均不可为 0。
- ◆ 当不使用大变形时，惯性矩可以为 0。
- ◆ 惯性矩参数可以是任意形状横截面的计算结果。但对任何形状截面的梁，其等效高度必须先行确定，因为计算弯曲应力时，将取中性轴至最外边的距离为高度的一半。
- ◆ 单元高度仅在弯曲计算和热应力分析时才会用到，应力沿着截面高度方向线性分布。
- ◆ 作用的温度梯度假定沿长度方向及高度方向线性变化。
- ◆ 当使用相容切线刚度矩阵 (**KEYOPT(2)=1**) 时，一定要注意使用切合实际的（即按比例）的单元实常数。这是因为相容应力刚度矩阵是基于单元应力来计算的，如果人为取过大或过小的截面特性，则计算的应力可能不正确，导致相应的应力刚度矩阵也不正确（相容应力刚度矩阵的某些分量或许会变成无穷大）。
- ◆ 在回转仪的模态分析中，特征值的计算对初始位移的变化是十分敏感的，可能导致特征值的实部或虚部存在错误。

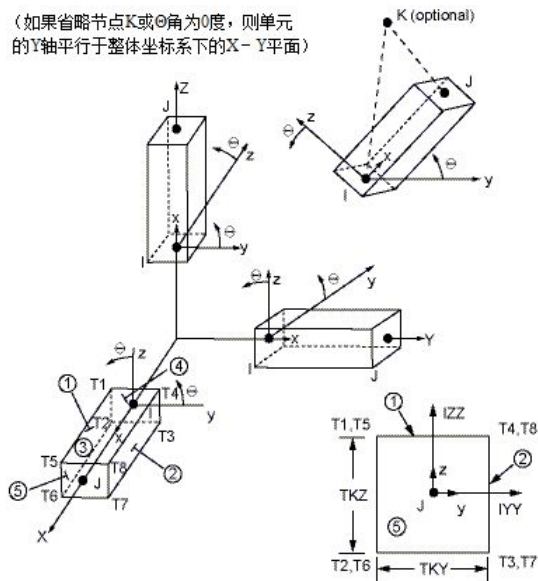


图 7.3 BEAM4 单元的几何模型

BEAM4 单元的输入参数总结如表 7.4 所示，更多输入信息可参阅 **ANSYS** 自带的帮助文件。**KEYOPT (2)** 用来控制在在大变形分析时是否激活（用命令，**[NLGEOM,ON]**）相容切线刚度矩阵（即由主切线刚度矩阵加上相容应力矩阵所组成的矩阵）。若打开这项设置，则在几何非线性分析时将获得快速收敛，例如在非线性屈曲分析时就可打开该项。但在分析刚性连结或耦合结点时不能激活该项。在刚度急剧变化的结构分析中也不应打开该项。**KEYOPT (7)** 用来控制是否进行不对称回转

阻尼矩阵的计算（常用于转子动态分析），所需的转动频率在实常数 SPIN 中输入（单位为弧度/时间，正方向为单元 X 轴正向），且单元本身必须是对称的（如，IYY=IZZ，SHEARY=SHEARZ）。可以在本单元的表面施加面载荷，如图 7.3 中的带圈数字所示，其中，箭头指向为面载荷作用的正向。横向均布压力的单位为力每单位长度，端点作用的压力应以集中力的形式输入。KEYOPT（9）用来控制两个节点中间部分相关值的输出情况，值是按平衡条件得出的。KEYOPT（10）用来控制线性变化的横向压力相对于单元节点的偏移量。可在单元几何图形的 8 个角上设定温度值，它们被当做体载荷处理。第一个角上的温度 T1 的默认值为 TUNIF，当其他角的温度未给定时，其默认值等于第一个角的温度；如果给定了 T1 和 T2，则 T3 的默认值为 T2，T4 的默认值为 T1，T5 到 T8 的值默认与 T1 到 T4 的值相对应。

表 7.4 BEAM4 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	BEAM4
节点	I, J, K
自由度	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
实常数	AREA, IZZ, IYY, TKZ, THETA, ISTRN, IXX, SHEARZ, SHEARY, SPIN, ADDMAS
材料特性	EX, ALPX(or CTEX or THSX), DENS, GXY, DAMP
表面载荷	压力—— face 1 (I-J) (-Z 法线方向), face 2 (I-J) (-Y 法线方向), face 3 (I-J) (+X 轴切线方向), face 4 (I) (+X 轴向), face 5 (J) (-X 轴向) (负值表示与图标方向相反)
体载荷	温度——T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8
特性	应力强化、大变形，单元生、死
KEYOPT（2）	应力强化项 0——当 NLGEOM 打开时，只采用主要的切向刚度矩阵 1——采用一致的切向刚度矩阵 2——不采用一致的切向刚度矩阵
KEYOPT（6）	力和力矩输出控制变量 0——不输出力和力矩 1——在单元坐标系中输出力和力矩
KEYOPT（7）	回转仪阻尼矩阵选项 0——无 1——计算回转仪阻尼矩阵，实常数 SPIN 必须大于 0，IYY=IZZ
KEYOPT（9）	用于控制该单元节点 I, J 其他数据的输出 N——输出 N 个中间位置数据 (N = 0, 1, 3, 5, 7, 9)

KEYOPT (10)

用于 SFBEAM 指令时线性变化的表面载荷

0——以长度为单位，负载相对于 I, J 节点的偏移量

1——以长度为单位 (0.0 to 1.0)，负载相对于 I, J 节点的偏移量

表 7.5 BEAM4 单元的实常数表

序号	名称	描述
1	AREA	横截面积
2	IZZ	惯性矩

(续表)

序号	名称	描述
3	IYY	惯性矩
4	TKZ	沿 Z 轴单元厚度
5	TKY	沿 Y 轴单元厚度
6	THETA	绕 X 轴的转角
7	ISTRN	初始应变
8	IXX	扭转惯性矩
9	SHEARZ	剪切变形常数 Z [1]
10	SHEARY	剪切变形常数 Y [2]
11	SPIN	转动频率 (当 KEYOPT(7) = 1 时设定)
12	ADDMAS	附加质量/单位长度

说明:

1. SHEARZ 与 IZZ 有关联，如果 SHWARZ=0 则表示忽略单元 Y 方向上的剪切变形。
2. SHEARY 与 IYY 有关联，如果 SHWARY=0 则表示忽略单元 Z 方向上的剪切变形。

BEAM4 单元的输出图如图 7.4 所示，其求解输出的节点位移包括在全部节点解中。最大应力是指轴向应力与弯曲应力的绝对值之和，最小应力是指轴向应力与弯曲应力的绝对值之差。其他输出信息如表 7.6 所示，其中第一列给出了各输出项的名称，用命令 ETABLE(POST1)及 ESOL(POST26)可定义这些变量用于查询，第二列是具体的含义，第三列表示某一变量值是否在输出文件中给出，第四列表示某一变量值是否在结果文件中给出。无论是第三列还是第四列，“Y”表示可以输出，具体数值则表示在满足特定条件时才输出，而“-”则表示不输出。

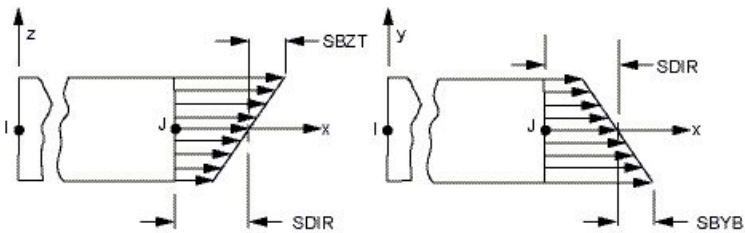


图 7.4 BEAM4 单元应力输出图

表 7.6 BEAM4 单元的输出数据定义列表

名称	定义	0	R
----	----	---	---

EL	单元号	Y	Y
NODES	单元节点- I, J	Y	Y
MAT	单元材料号	Y	Y
VOLU:	单元体积	-	Y
XC, YC, ZC	输出结果坐标	Y	3
TEMP	积分点上的温度 T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8	Y	Y

(续表)

名称	定义	0	R
PRES	压力 P1 在节点 I, J; 偏移量 1 在 I, J; 压力 P2 在 I, J; 偏移量 2 在 I, J; 压力 P3 在 I, J; 偏移量 3 在 I, J; 压力 P4 在 I; 压力 P5 在 J	Y	Y
SDIR	轴向正应力	1	1
SBYT	梁内单元+Y 面上的弯曲应力	1	1
SBYB	梁内单元-Y 面上的弯曲应力	1	1
SBZT	梁内单元+Z 面上的弯曲应力	1	1
SBZB	梁内单元-Z 面上的弯曲应力	1	1
SMAX	最大应力 (正应力+弯曲应力)	1	1
SMIN	最小应力 (正应力-弯曲应力)	1	1
EPELDIR	端部轴向弹性应变	1	1
EPELBYT	梁内单元+Y 面上的弯曲弹性应变	1	1
EPELBYB	梁内单元-Y 面上的弯曲弹性应变	1	1
EPELBZT	梁内单元+Z 面上的弯曲弹性应变	1	1
EPELBZB	梁内单元-Z 面上的弯曲弹性应变	1	1
EPTHDIR	端点轴向热应变	1	1
EPTHBYT	梁内单元+Y 面上的弯曲热应变	1	1
EPTHBYB	梁内单元-Y 面上的弯曲热应变	1	1
EPTHBZT	梁内单元+Z 面上的弯曲热应变	1	1
EPTHBZB	梁内单元-Z 面上的弯曲热应变	1	1
EPINAXL	单元初始轴向应变	1	1
MFOR(X, Y, Z)	单元坐标系中 X, Y, Z 方向的力	2	Y
MMOM(X, Y, Z)	单元坐标系中 X, Y, Z 方向的弯矩	2	Y

说明:

- 1. 每个单元的节点 I, J 及中间点 (见 KEYOPT(9)) 均列出该项结果。
- 2. 如果 KEYOPT(6) = 1, 则仅在几何中心作*GET 的一个项目可用。

BEAM4 单元 KEYOPT(9)=0 时的项目和顺序号列表如表 7.7 所示, 该表列出了在后处理中可通过 ETABLE 命令加参数及数字顺序号的方法定义可列表查看的有关变量的细则。其中, 顺序号是单

元数据为常数或单值时对应的序号。**KEYOPT(9)=1、3、5、7、9** 时的用于 **ETABLE** 和 **ESOL** 命令的输出项和顺序号列表请参见帮助文件。

表 7.7 BEAM4 单元的用于 ETABLE 和 ESOL 命令的输出项和顺序号列表（KEYOPT(9)=0）

变量名（名称对应表 7.6）	ETABLE 和 ESOL 命令输出项			
	输出项	顺序号	I	J
SDIR 轴向直接应力	LS	–	1	6
SBYT 梁内单元+Y 面上的弯曲应	LS	–	2	7

（续表）

变量名（名称对应表 7.6）	ETABLE 和 ESOL 命令输出项			
	输出项		输出项	
SBYB 梁内单元-Y 面上的弯曲应力	LS	–	3	8
SBZT 梁内单元+Z 面上的弯曲应力	LS	–	4	9
SBZB 梁内单元-Z 面上的弯曲应力	LS	–	5	10
EPELDIR 端部轴向弹性应变	LEPEL	–	1	6
EPELBYT 梁内单元+Y 面上的弯曲弹性应变	LEPEL	–	2	7
EPELBYB 梁内单元-Y 面上的弯曲弹性应变	LEPEL	–	3	8
EPELBZT 梁内单元+Z 面上的弯曲弹性应变	LEPEL	–	4	9
EPELBZB 梁内单元-Z 面上的弯曲弹性应变	LEPEL	–	5	10
SMAX 最大应力（正应力+弯曲应力）	NMISC	–	1	3
SMIN 最小应力（正应力-弯曲应力）	NMISC	–	2	4
EPTHDIR 端点轴向热应变	LEPTH	–	1	6
EPTHBYT 梁内单元+Y 面上的弯曲热应变	LEPTH	–	2	7
EPTHBYB 梁内单元-Y 面上的弯曲热应变	LEPTH	–	3	8
EPTHBZT 梁内单元+Z 面上的弯曲热应变	LEPTH	–	4	9
EPTHBZB 梁内单元-Z 面上的弯曲热应变	LEPTH	–	5	10
EPINAXL 单元初始轴向应变	LEPTH	11	–	–
MFORX 单元坐标系中 X 方向的力	SMISC	–	1	7
MFORY 单元坐标系中 Y 方向的力	SMISC	–	2	8
MFORZ 单元坐标系中 Z 方向的力	SMISC	–	3	9
MMOMX 单元坐标系中 X 方向的弯矩	SMISC	–	4	10
MMOMY 单元坐标系中 Y 方向的弯矩	SMISC	–	5	11
MMOMZ 单元坐标系中 Z 方向的弯矩	SMISC	–	6	12
P1 压力 1 在节点 I, J 间	SMISC	–	13	14
OFFST1 压力 1 距节点偏移量	SMISC	–	15	16
P2 压力 2 在节点 I, J 间	SMISC	–	17	18
OFFST2 压力 2 距节点偏移量	SMISC	–	19	20
P3 压力 3 在节点 I, J 间	SMISC	–	21	22

OFFST3 压力 3 距节点偏移量		SMISC	-	23	24				
P4 压力 4		SMISC	-	25	-				
P5 压力 5		SMISC	-	-	26				
		Pseudo Node（伪节点）							
		1	2	3	4	5	6	7	8
温度	LBFE	1	2	3	4	5	6	7	8

7.2.3 BEAM188 和 BEAM189 单元特性简介

BEAM188 为三维线性有限应变梁单元，而 **BEAM189** 为三维二次有限应变梁单元。二者均适合于分析从细长到中等短粗的梁结构，均基于铁木辛哥梁结构理论，并都考虑了剪切变形的影响。其中，**BEAM188** 为 2 节点 3D 梁单元，**BEAM189** 为 3 节点 3D 梁单元。每个节点有 6 个或 7 个自由度，自由度的个数取决于 **KEYOPT(1)** 的值。当 **KEYOPT(1)=0**（默认）时，每个节点有 6 个自由度。节点坐标系 **x**、**y**、**z** 方向的平动和绕 **x**、**y**、**z** 轴的转动；当 **KEYOPT(1)=1** 时，每个节点有 7 个自由度，此时引入了第 7 个自由度（横截面的翘曲）。

BEAM188 和 **BEAM189** 提供了更强大的非线性分析能力、更出色的截面数据定义功能和可视化特性。**BEAM188** 和 **BEAM189** 的横截面定义为垂直于梁的轴向的截面形状。**ANSYS** 提供了 11 种常用截面形状的梁横截面库，并支持用户自定义截面形状，可以采用 **sectype**、**secdata**、**secoffset**、**secwrite** 及 **secread** 定义横截面，如图 7.5 所示。当定义了一个横截面时，**ANSYS** 建立一个 9 结点的数值模型来确定梁的截面特性（**Iyy**，**Izz** 等），并求解泊松方程得到弯曲特征。图 7.6 是用 **secdata** 命令定义的横截面形状，对应的菜单命令为 **Main Menu→Preprocessor→Sections→Beam→Common Section**。它是一个标准的工字型横截面，显示出了截面的质心、剪切中心以及计算的横截特性。横截面和用户自定义截面网格划分将存储在横截面库文件中。可以用 **LATT** 命令将梁横截面属性赋给线实体。这样，横截面的特性将在用 **BEAM188** 或 **BEAM189** 对该线划分网格时包含进去。



图 7.5 梁横截面库

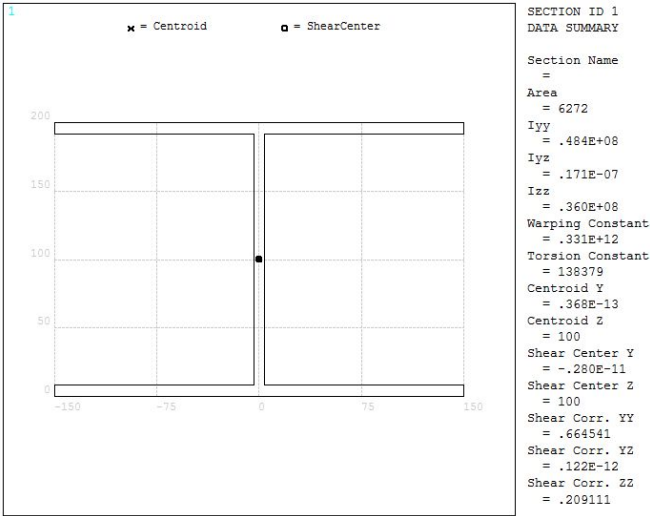


图 7.6 工字型横截面图

BEAM188 和 BEAM189 单元的输出数据格式及定义也十分重要,读者可自行参阅 ANSYS 自带的帮助文件,本书将在后面结合实例进行讲解。

7.3 梁系结构有限元分析实例详解 1: 多跨连续梁静力分析

本节介绍多跨连续梁的静力分析过程,重点介绍节点耦合、均布载荷施加及弯矩、剪力结果观看等内容。

7.3.1 问题描述与分析

如图 7.7 所示的多跨静定梁,梁截面为方形,边长为 0.5m。AC 段作用有分布力 5kN/m, H 端作用有集中力 5kN。C、E、G 点简支, B 点铰支, D、F 处铰结。弹性模量 $E=2.1\times10^{11}\text{Pa}$, 泊松比 $\nu=0.3$ 。分析梁的变形及支座反力,并绘制出结构内力图。

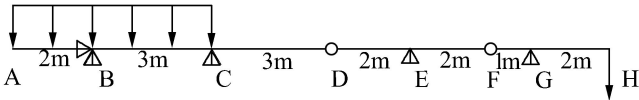


图 7.7 多跨静定梁

由于该模型比较简单,可采用直接建立节点、单元的方法进行有限元建模。但为了使绘制的内力图光滑,此处选择正常做法,即先建立关键点、建立线,然后划分网格、加载求解,最后进行结果查看。单元类型选择 BEAM3 二维梁单元,单元长度设为 0.5m。

7.3.2 求解过程

本节详细阐述该实例的求解过程。

7.3.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口,如图 7.8 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品,在 Working Directory 输入栏中输入工作目录: C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 7\7-1,在 Job Name 栏中输入工作文件名:Chapter7-1。以上参数设置完毕后,单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

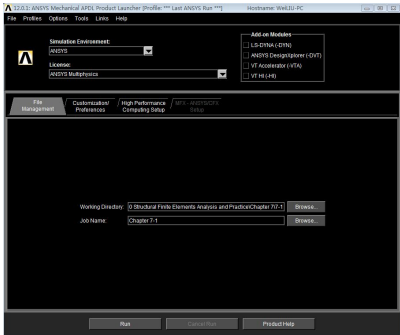


图 7.8 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口



可以先在目标文件位置建立工作目录,然后单击 Browse 按钮选择工作目录;也可以通过单击 Browse 按钮选择工作文件名。

7.3.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1

选择 Main Menu→Preferences 命令,弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框,如图 7.9 所示。在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框,过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项,单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令,弹出 Element Types 对话框,如图 7.10 所示。单击 Add 按钮,弹出 Library of Element Types 对话框,在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 中的 2D elastic 3 单元,如图 7.11 所示,单击 OK 按钮关闭该对话框,单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

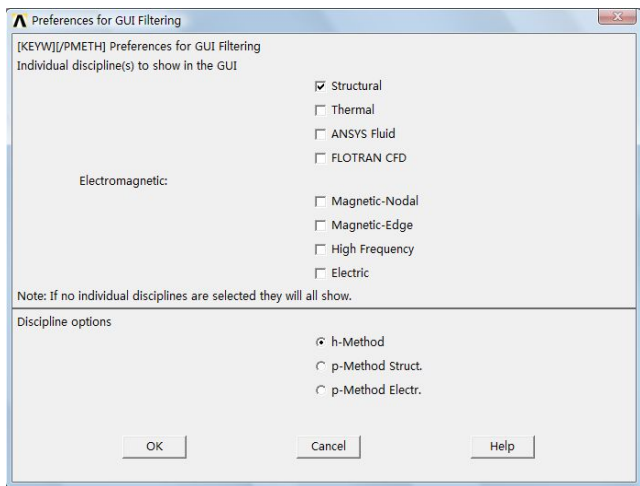


图 7.9 Preferences for GUI Filtering 对话框

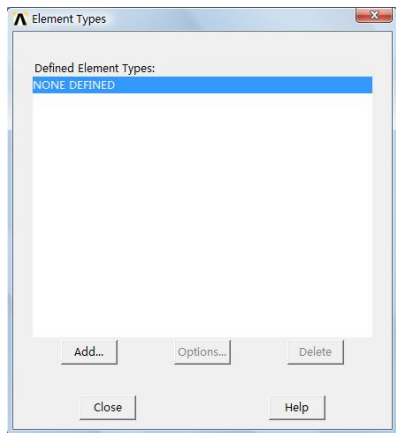


图 7.10 Element Types 对话框

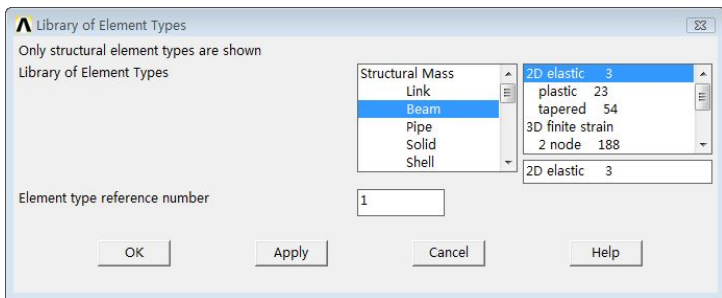


图 7.11 Library of Element Types 对话框

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令,弹出 Define Material Model Behavior 对话框,在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项,如图 7.12 所示,弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框,在 EX 输入栏中输入 2.1×10^{11} ,在 PRXY 输入栏中输入 0.3,如图 7.13 所示,单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令,关闭该对话框。



step 4

选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，单击 OK 按钮，弹出 Real Constants for BEAM3 对话框，输入参数，如图 7.14 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Real Constants 对话框。

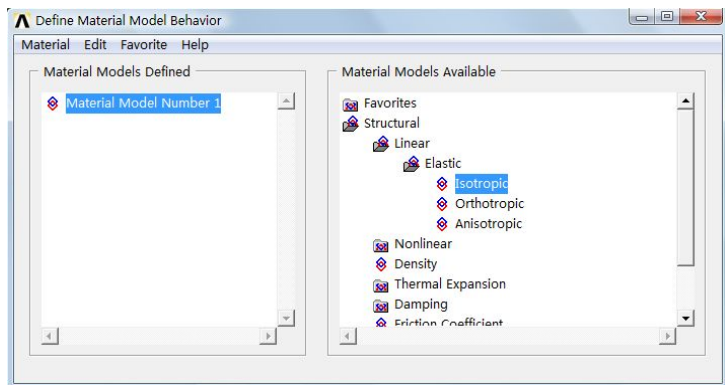


图 7.12 Define Material Model Behavior 对话框

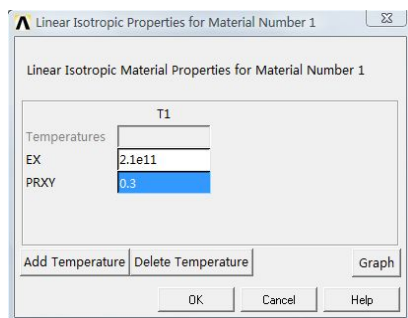


图 7.13 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

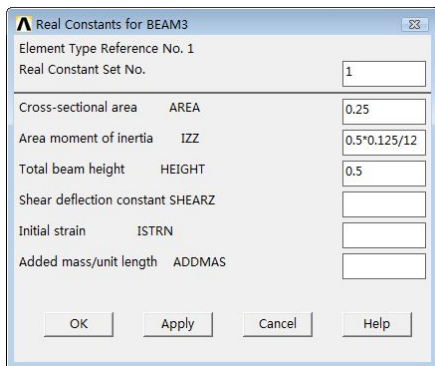



图 7.14 Real Constants for BEAM3 对话框

step 5

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。



也可用鼠标单击  按钮或 SAVE_DB 按钮来实现保存操作。

7.3.2.3 创建几何模型



step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 0、0、0，如图 7.15 所示，单击 Apply 按钮建立关键点 1；然后按表 7.8 所示的关键点坐标值建立其他关键点，建立完所有关键点后的结果如图 7.16 所示。

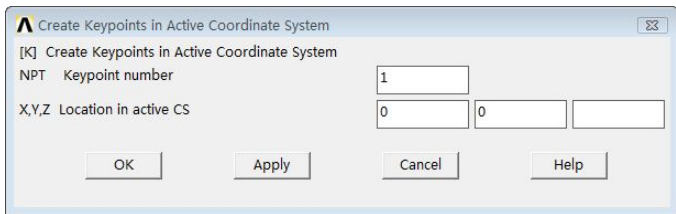


图 7.15 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

表 7.8 关键点坐标值

关键点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X 坐标	0	2	5	8	8	10	12	12	13	15
Y 坐标	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



图 7.16 建立完所有关键点后的结果



关键点 4、5 和关键点 7、8 都是重复的点，目的是为了进行方便进行节点耦合操作。

step 2 连接关键点，建立线。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line 命令，弹出 Create Straight Line 拾取菜单，如图 7.17 所示，选择关键点 1, 2，单击 Create Straight Line 拾取菜单中的 Apply 按钮，生成直线；再选择关键点 2, 3 生成直线；然后再选择关键点 3, 4 生成直线，由于 4, 5 点重合，此时会弹出 Multiple_Entities 对话框，如图 7.18 所示，观察图中所示的选择点是不是关键点 4，如果不是，则通过 Prev 和 Next 按钮来选择，然后单击 OK 按钮，关闭 Multiple_Entities

对话框；再选择关键点 5, 6 生成直线，由于 4, 5 点重合，此时也会出现 Multiple_Entities 对话框，观察图中所示的选择点是不是关键点 5，如果不是，则单击图 7.18 所示的 Next 按钮，此时选择的关键点变为 5，然后单击 OK 按钮，关闭 Multiple_Entities 对话框；重复上述操作，选择关键点 6, 7 生成直线，选择关键点 8, 9 生成直线，选择关键点 9, 10 生成直线。

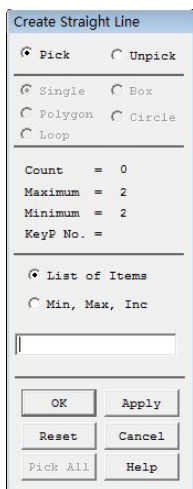


图 7.17 Create Straight Line 拾取菜单

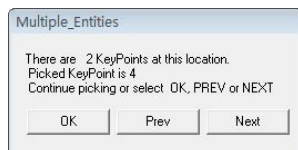


图 7.18 Multiple_Entities 对话框



生成线时，我们单击 Create Straight Line 拾取菜单中的 Apply 按钮来确认操作，也可以直接按鼠标左键来完成此操作。

step 3

显示关键点和线的编号。选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，分别选择 KP Keypoint numbers 和 LINE Line numbers 复选框，使其状态由 Off 变为 On，如图 7.19 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Utility Menu→Plot→Lines 命令，此时，ANSYS 图形界面显示的结果如图 7.20 所示。



此操作的作用为显示关键点及线的编号。

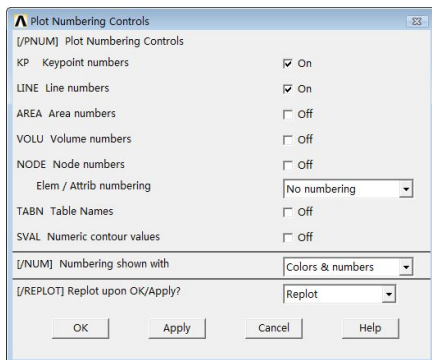


图 7.19 Plot Numbering Controls 对话框

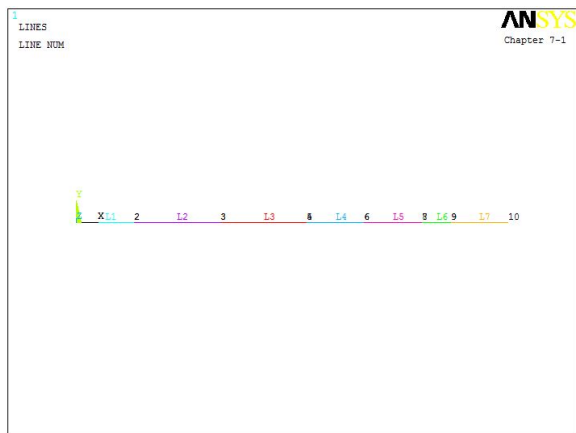


图 7.20 ANSYS 图形界面显示生成所有线后的结果

step 4

至此，我们已经完成了几何模型的建立，选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

7.3.2.4 划分网格

step 1

选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**ManualSize**→**Lines**→**All Lines** 命令，弹出 **Element Sizes on All Selected Lines** 对话框，在 **SIZE Element edge length** 输入栏中输入 0.5，即每 0.5m 划分一个单元，如图 7.21 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 2

选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Lines** 命令，弹出 **Mesh Lines** 拾取菜单，如图 7.22 所示，单击 **Pick All** 按钮，生成所有单元后关闭菜单。

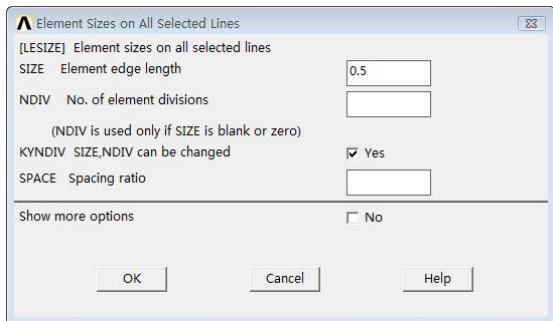


图 7.21 Element Sizes on All Selected Lines 对话框

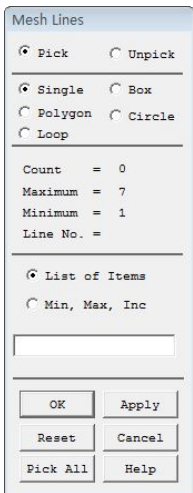


图 7.22 Mesh Lines 拾取菜单

单

step 3

显示单元编号及单元。选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，分别选择 **KP Keypoint numbers** 和 **LINE Line numbers** 复选框，使其状态由 **On** 变为 **Off**；在 **Elem/Attrib numbering** 下拉菜单中选择 **Element**

numbers 选项，如图 7.23 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 **Utility Menu→Plot→Elements** 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 7.24 所示的多跨连续梁单元划分结果，即有限元模型。

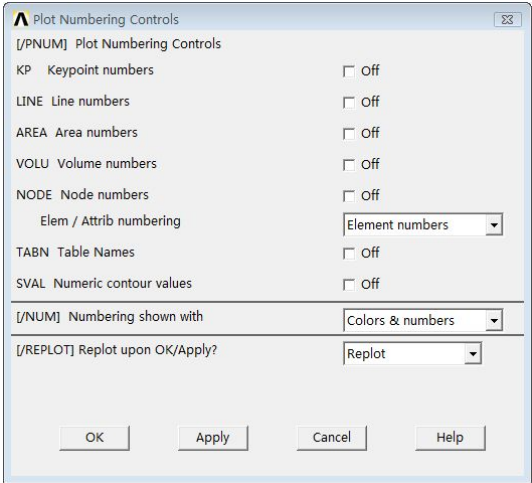


图 7.23 Plot Numbering Controls 对话框

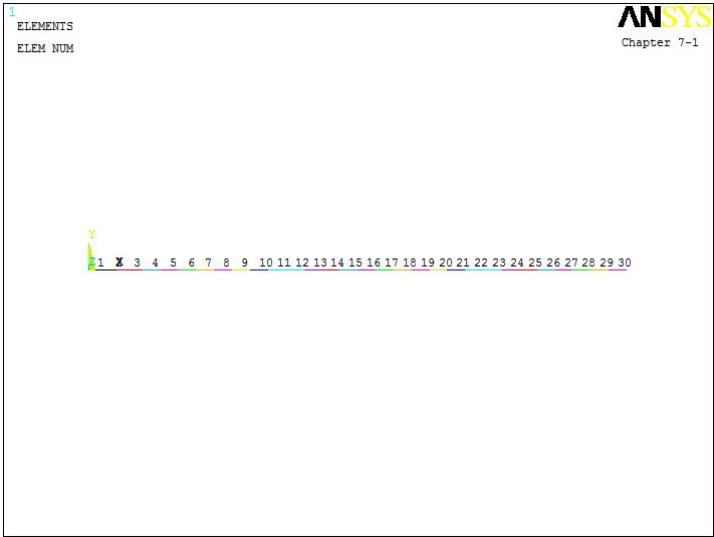


图 7.24 多跨连续梁单元划分结果



显示编号操作可有可无，目的只是为了方便读者查看结果。当然，在建立复杂几何模型和复杂有限元模型时，有时需要选择某一关键点、线、面、节点、单元，显示编号操作会使其更方便。

step 4

显示节点。选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Numbering** 命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，取消单元编号选择，选中 **NODE Node numbers** 复选框，使其状态由 Off 变为 On，结果如图 7.25 所示。从图中可以看出，节点 12、18 是重复的节点，节点 23、27 是重复的节点。我们将在下一步分别对其进行耦合操作，使其变为铰结节点。

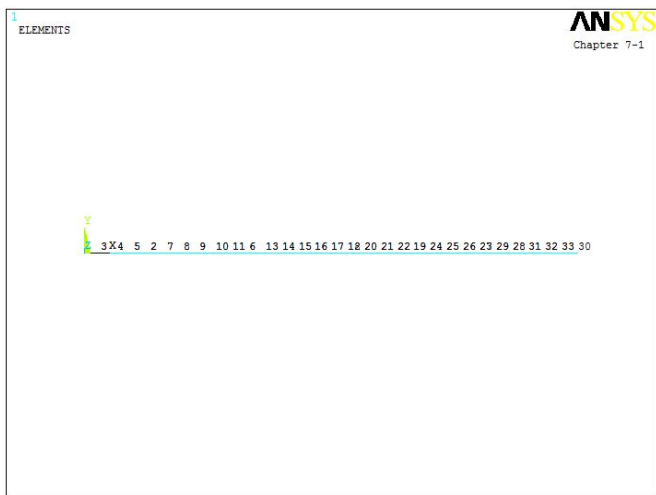


图 7.25 显示节点结果

step 5

节点耦合操作。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Coupling/Ceqn**→**Couple DOFs** 命令，弹出 **Define Coupled DOFs** 拾取菜单，选择 **Box** 窗选方式，如图 7.26 所示，在图形窗口中选择 12, 18 号节点，注意观察 **Define Coupled DOFs** 拾取菜单的变化，观察 **Count** 项是否变为 2，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Define Coupled DOFs** 对话框，在 **NSET Set reference number** 输入框中输入 1，在 **Lab Degree-of-freedom label** 下拉列表框中选择 **UX** 选项，如图 7.27 所示，单击 **Apply** 按钮。再次在 **Define Coupled DOFs** 拾取菜单中选择 **Box** 窗选方式，在图形窗口上再次选择 12, 18 号节点，注意观察 **Define Coupled DOFs** 拾取菜单的变化，观察 **Count** 项是否变为 2，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Define Coupled DOFs** 对话框，在 **NSET Set reference number** 输入框中输入 2，在 **Lab Degree-of-freedom label** 下拉列表框中选择 **UY** 选项，单击 **Apply** 按钮。重复上述操作，选择 23, 27 号节点，定义 23, 27 号节点 **UX** 方向的耦合自由度 **Set reference number** 为 3，定义 23, 27 号节点 **UY** 方向的耦合自由度 **Set reference number** 为 4。单击 **OK** 按钮退出 **Define Coupled DOFs** 拾取菜单。此时 ANSYS 图形窗口的显示结果如图 7.28 所示。

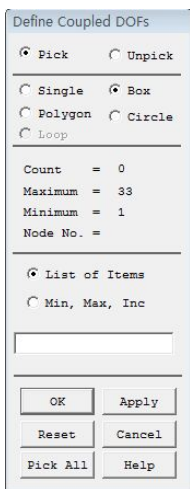


图 7.26 Define Coupled DOFs 拾取菜单



图 7.27 Define Coupled DOFs 对话框

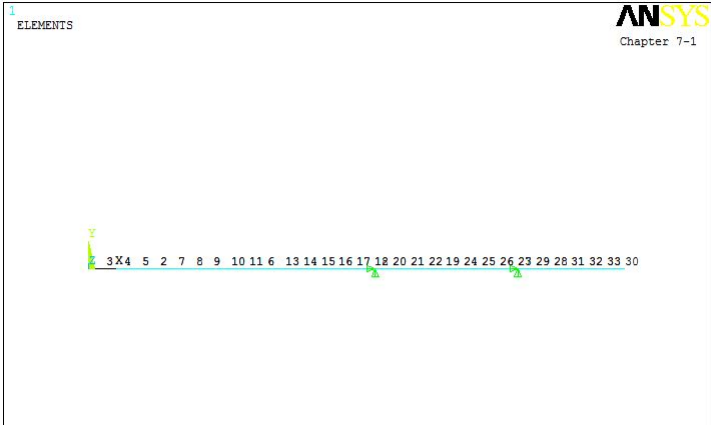


图 7.28 定义耦合自由度后的结果



选择耦合自由度节点时，也可不采用窗选形式，可以在 Define Coupled DOFs 拾取菜单的输入栏中输入节点编号后回车进行选择。

step 6 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。选择 Main Menu →Finish 命令，退出前处理器。

7.3.2.5 加载求解

step 1 选择 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Keypoints 命令，弹出 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单，如图 7.29 所示。用鼠标拾取关键点 2，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on KPs 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX, UY 选项，如图 7.30 所示，单击 Apply 按钮，对关键点 2 进行 X, Y 方向的约束；再用鼠标拾取节点 3，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on KPs 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY 选项，单击 Apply 按钮，对关键点 3 进行 Y 方向的约束；重复上述操作，分别对关键点 6, 9 施加 Y 方向的约束，单击 OK 按钮关闭该对话框。ANSYS 窗口显示的施加位移约束后的结果如图 7.31 所示。

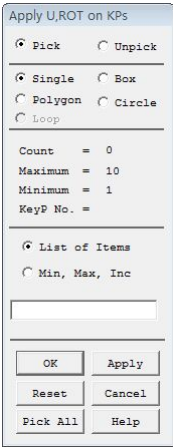


图 7.29 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单

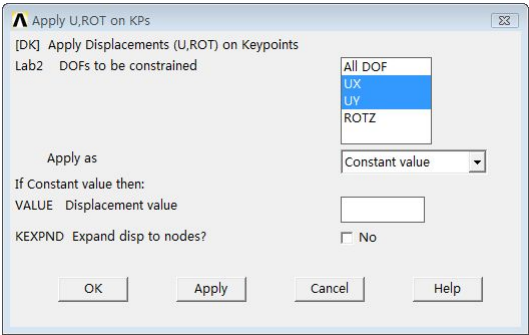


图 7.30 Apply U,ROT on KPs 对话框

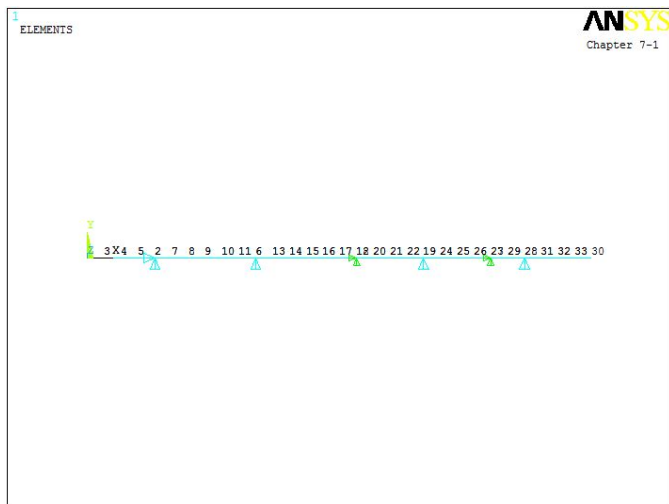


图 7.31 施加位移约束后的结果



由结构力学的知识可知，施加上述约束后该多跨连续梁为静定结构。

step 2

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On beams 命令，弹出 Apply PRES on Beams 拾取菜单，选择窗选方式 Box，如图 7.32 所示，窗选关键点 1, 3 之间的所有单元，单击 Apply 按钮，弹出 Apply PRES on Beams 对话框，在 Pressure value at node I 和 Pressure value at node J 输入栏中均输入 5000，如图 7.33 所示，单击 OK 按钮退出该对话框。选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Keypoints 命令，弹出 Apply F/M on KPs 拾取菜单，如图 7.34 所示，单击 OK 按钮，弹出 Apply F/M on KPs 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉列表框中选择 FY 选项，在 VALUE Force/moment value 输入框中输入 -5000，如图 7.35 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。ANSYS 窗口显示的施加载荷后的结果如图 7.36 所示。

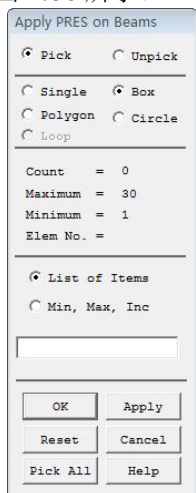


图 7.32 Apply PRES on Beams 拾取菜单

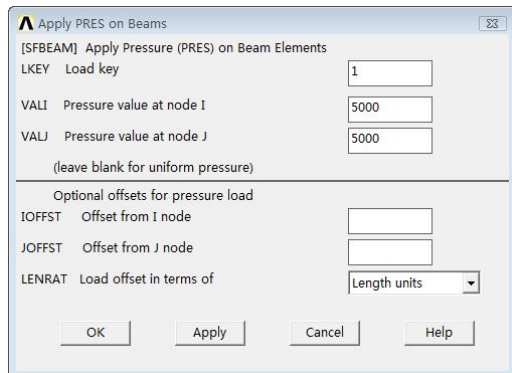


图 7.33 Apply PRES on Beams 对话框

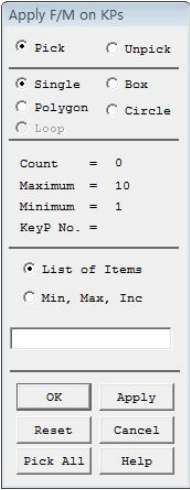


图 7.34 Apply F/M on KPs 拾取菜单

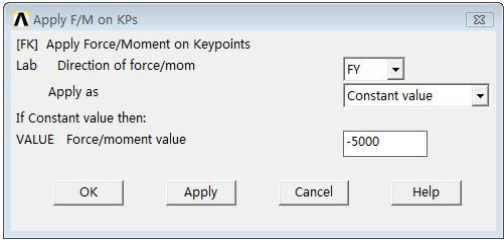


图 7.35 Apply F/M on KPs 对话框

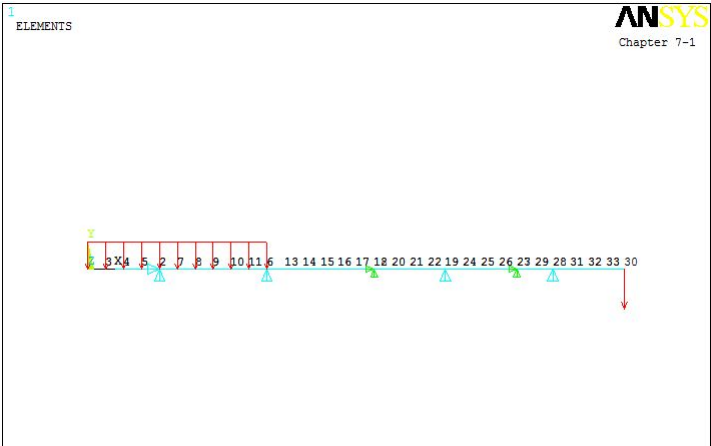


图 7.36 施加载荷后的结果



此操作为对多跨连续梁施加均布载荷和集中载荷，均布载荷指向梁截面则为正值，集中载荷输入为负值表示其方向为 Y 轴负方向。

step 3

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，如图 7.37 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

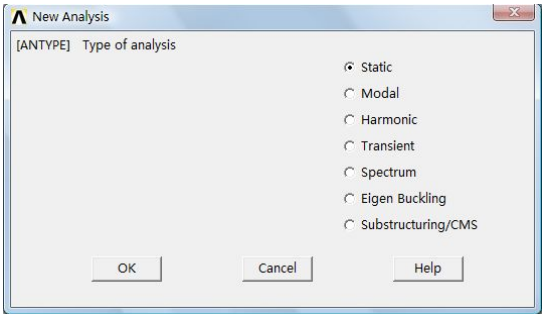


图 7.37 New Analysis 对话框

step 4 选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，如图 7.38 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

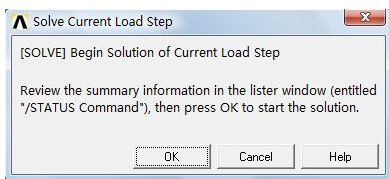


图 7.38 Solve Current Load Step 对话框

step 5 求解结束时，弹出 Note 对话框，如图 7.39 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

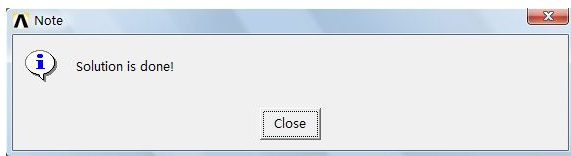


图 7.39 Note 对话框

step 6 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。至此，加载及求解过程结束，下面开始查看和分析结果。

7.3.2.6 查看求解结果

step 1 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undeformed 单选按钮，如图 7.40 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 7.41 所示。

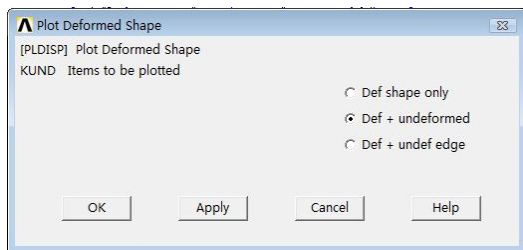


图 7.40 Plot Deformed Shape 对话框

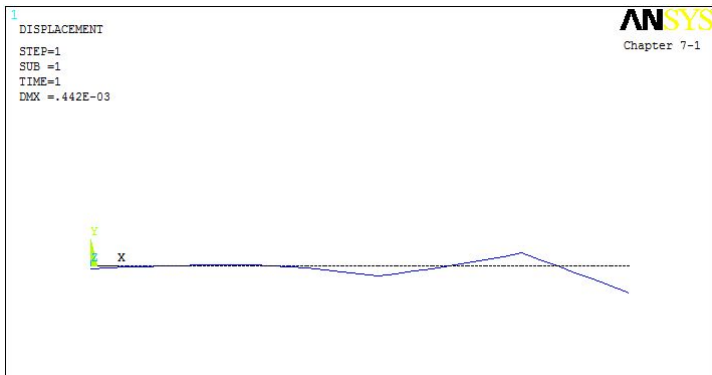


图 7.41 变形后的几何形状和未变形的几何形状



从图 7.41 中可以看出，两个铰结节点的位移是连续的，但转角是不连续的，这一点符合铰结节点的基本概念。

step 2

选择 Main Menu → General Postproc → List Results → Reaction Solu 命令，弹出 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All struc force F 选项，如图 7.42 所示，单击 OK 按钮，显示支座节点反作用力结果列表，如图 7.43 所示。

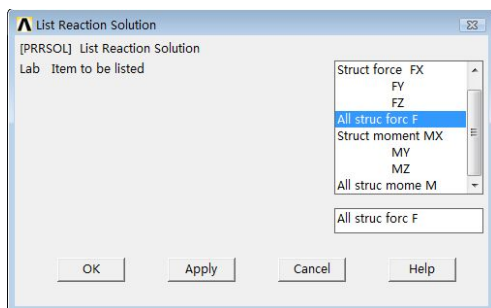


图 7.42 List Reaction Solution 对话框

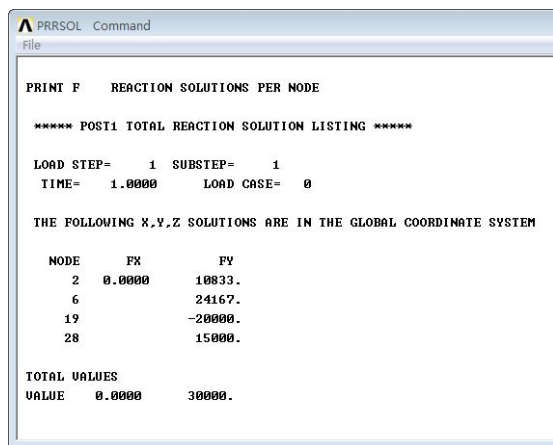


图 7.43 支座节点反作用力结果列表



可根据结构力学的知识验证支座节点反作用力的正确性。

step 3

选择 Main Menu → General Postproc → Element Table → Define Table 命令，弹出 Element Table Data 对话框，如图 7.44 所示，单击 Add...按钮，弹出 Define Additional Element Table Items 对话框，在 User label for item 输入栏中输入 Imoment，在 Item, Comp Results data item 的左边下拉列表框中选择 By sequence num 选项，在右边下拉列表框中选择 SMISC,选项，在下面的输入栏中输入 6，如图 7.45 所示，单击 Apply 按钮。再次在 User label for item 输入栏中输入 Jmoment，在 Item, Comp Results data item 的左边下拉列表框中选择 By sequence num 选项，在右边下拉列表框中选择 SMISC,选项，在下面的输入栏中输入 12，单击 Apply 按钮。重复上述操作，在 User label for item 输入栏中输入 Ishear，在 Item, Comp Results data item 的左边下拉列表框中选择 By

sequence num 选项，在右边下拉列表框中选择 SMISC,选项，在下面的输入栏中输入 2，单击 Apply 按钮。再次在 User label for item 输入栏中输入 Jshear，在 Item, Comp Results data item 的左边下拉列表框中选择 By sequence num 选项，在右边下拉列表框中选择 SMISC,选项，在下面的输入栏中输入 8，单击 OK 按钮。此时，Element Table Data 对话框如图 7.46 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

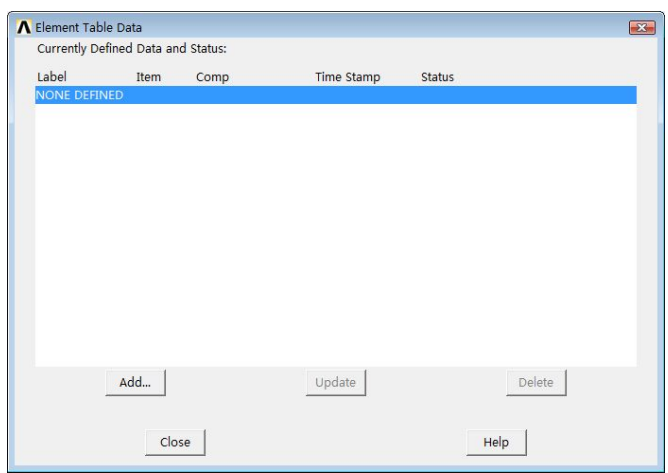


图 7.44 Element Table Data 对话框

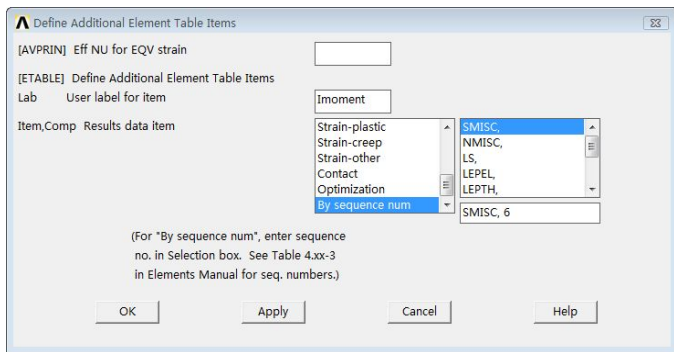


图 7.45 Define Additional Element Table Items 对话框

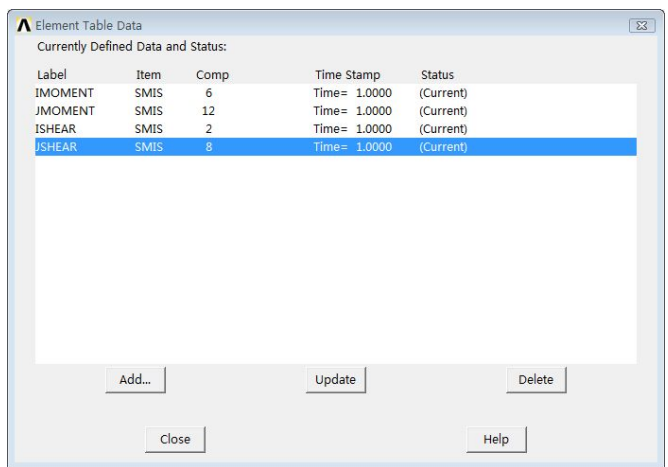


图 7.46 Element Table Data 对话框



该操作为输出 BEAM3 梁单元的弯矩和剪力结果，BEAM3 单元的具体输出设置及参数含义可参考 7.2 节的相关内容或 ANSYS 程序的 BEAM3 单元帮助文件。

step 4 选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→List Element Table 命令，弹出 List Element Table Data 对话框，在 Lab1-9 Items to be listed 下拉列表框中选择 IMOMENT, JMOMENT, ISHEAR, JSHEAR 选项，如图 7.47 所示，单击 OK 按钮，弹出 PRETAB Command 列表框，如图 7.48 所示，从中可以看出各个单元的弯矩和剪力结果。

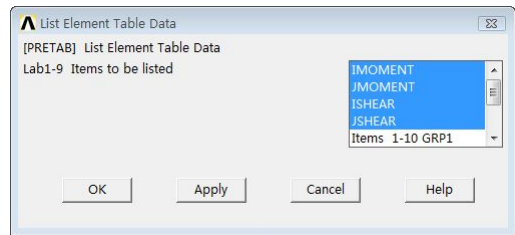


图 7.47 List Element Table Data 对话框

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT				
***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****				
STAT ELEM	CURRENT IMOMENT	CURRENT JMOMENT	CURRENT ISHEAR	CURRENT JSHEAR
1	-0.82451E-10	-625.00	-0.69849E-09	2500.0
2	-625.00	-2500.0	2500.0	5000.0
3	-2500.0	-5625.0	5000.0	7500.0
4	-5625.0	-10000.	7500.0	10000.
5	-10000.	-10208.	-833.33	1666.7
6	-10208.	-11667.	1666.7	4166.7
7	-11667.	-14375.	4166.7	6666.7
8	-14375.	-18333.	6666.7	9166.7
9	-18333.	-23542.	9166.7	11667.
10	-23542.	-30000.	11667.	14167.
11	-30000.	-25000.	-10000.	-10000.
12	-25000.	-20000.	-10000.	-10000.
13	-20000.	-15000.	-10000.	-10000.

图 7.48 PRETAB Command 列表框

step 5 绘制弯矩图。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令，弹出 Plot Line-Element Results 对话框，在 LabI Elem table item at node I 下拉列表框中选择 IMOMENT 选项，在 LabJ Elem table item at node J 下拉列表框中选择 JMOMENT 选项，如图 7.49 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 窗口显示的弯矩结果如图 7.50 所示。

step 6 绘制剪力图。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令，弹出 Plot Line-Element Results 对话框，在 LabI Elem table item at node I 下拉列表框中选择 ISHEAR，在 LabJ Elem table item at node J 下拉列表框中选择 JSHEAR 选项，如图 7.51 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 窗口显示的剪力结果如图 7.52 所示。

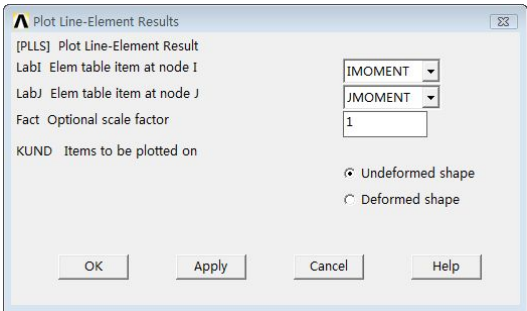


图 7.49 Plot Line-Element Results 对话框



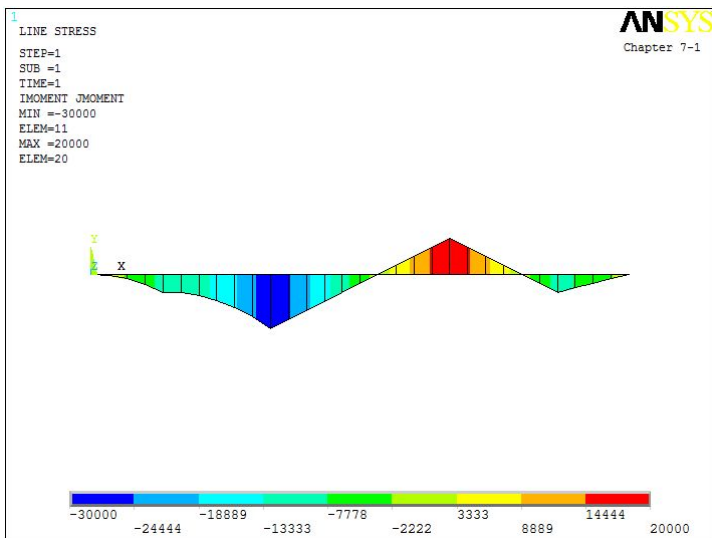


图 7.50 弯矩结果显示

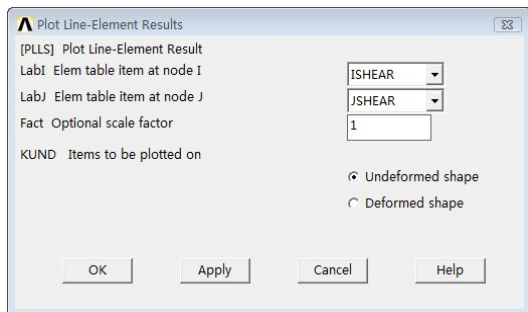


图 7.51 Plot Line-Element Results 对话框

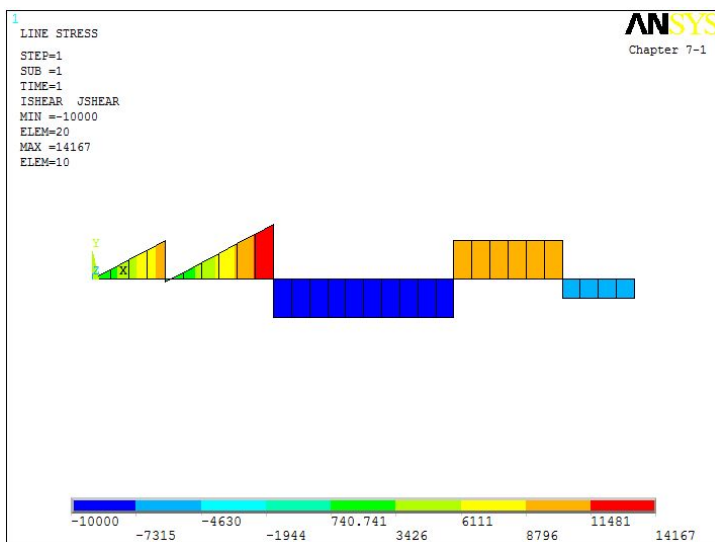


图 7.52 剪力结果显示



可以根据结构力学的知识检验结果的正确性。



step 7 选择 **Utility Menu→File→Exit** 命令,弹出 **Exit from ANSYS** 对话框,选择 **Save Everything** 单选按钮,如图 7.53 所示,单击 **OK** 按钮,关闭 ANSYS 程序。

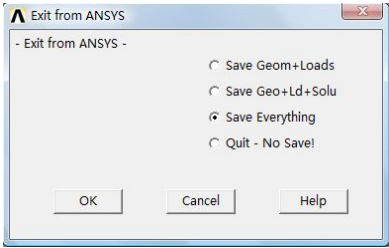


图 7.53 Exit from ANSYS 对话框

7.3.3 命令流

```
/PREP7

ET,1,BEAM3      ! 定义单元类型

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e11      ! 定义材料属性
MPDATA,PRXY,1,,0.3

R,1,0.25,0.5*0.125/12,0.5, , , ,      ! 定义实常数

SAVE

K,1,,,,      ! 建立关键点
K,2,2,,,
K,3,5,,,
K,4,8,,,
K,5,8,,,
K,6,10,,,
K,7,12,,,
K,8,12,,,
K,9,13,,,
K,10,15,,,
SAVE

LSTR,      1,      2      ! 建立线
LSTR,      2,      3
LSTR,      3,      4
LSTR,      5,      6
LSTR,      6,      7
LSTR,      8,      9
LSTR,      9,      10

LESIZE,ALL,0.5, , , ,1, , ,1,      ! 划分网格
LMESH, ALL, , ,
```

```

CP, 1, UX, 12,18      ! 耦合自由度
CP, 2, UY, 12,18
CP, 3, UX, 23,27
CP, 4, UY, 23,27

SAVE

/SOL
DK, 2, UX,           ! 施加约束
DK, 2, UY,
DK, 3, UY,
DK, 6, UY,
DK, 9, UY,

SFBEAM,1,1,PRES,5000,5000,    ! 施加均布载荷
SFBEAM,2,1,PRES,5000,5000,
SFBEAM,3,1,PRES,5000,5000,
SFBEAM,4,1,PRES,5000,5000,
SFBEAM,5,1,PRES,5000,5000,
SFBEAM,6,1,PRES,5000,5000,
SFBEAM,7,1,PRES,5000,5000,
SFBEAM,8,1,PRES,5000,5000,
SFBEAM,9,1,PRES,5000,5000,
SFBEAM,10,1,PRES,5000,5000,

FK,10,FY,-5000          ! 施加集中力

ANTYPE,0      ! 求解
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH

/POST1      ! 后处理
PLDISP,1      ! 查看变形

PRRSOL,F      ! 列表显示反力

ETABLE,Imoment,SMISC, 6      ! 将节点弯矩制表
ETABLE,Jmoment,SMISC, 12
ETABLE,Ishear,SMISC, 2
ETABLE,Jshear,SMISC, 8

PRETAB,IMOMENT,JMOMENT,ISHEAR,JSHEAR      ! 列表显示单元弯矩剪力

PLLS,IMOMENT,JMOMENT,1,0
PLLS,ISHEAR,JSHEAR,,1,0

FINISH
! /EXIT,ALL

```

7.4 梁系结构有限元分析实例详解 2：门式钢架静力分析

本节介绍土木工程中常用的门式钢架结构的静力分析过程。

7.4.1 问题描述与分析

如图 7.54 所示的门式钢架受到均布载荷 $q=2000\text{N/m}$ 作用，跨度为 18m ，柱高度为 4.5m ，中间屋脊高度为 5.4m ，截面尺寸如图 7.54 所示，结构材料为钢材，弹性模量 $E=2.1\times 10^{11}\text{Pa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ 。且已知柱与梁的横截面积形式均为热轧 H 型钢 $\text{HN}400\times 200$ ，参数如下： $W_1=0.2$ ， $W_2=0.2$ ， $W_3=0.4$ ， $t_1=0.013$ ， $t_2=0.013$ ， $t_3=0.008$ 。试求在均布载荷 q 作用下门式钢架的变形及支座反力，并绘制结构弯矩图及剪力图。

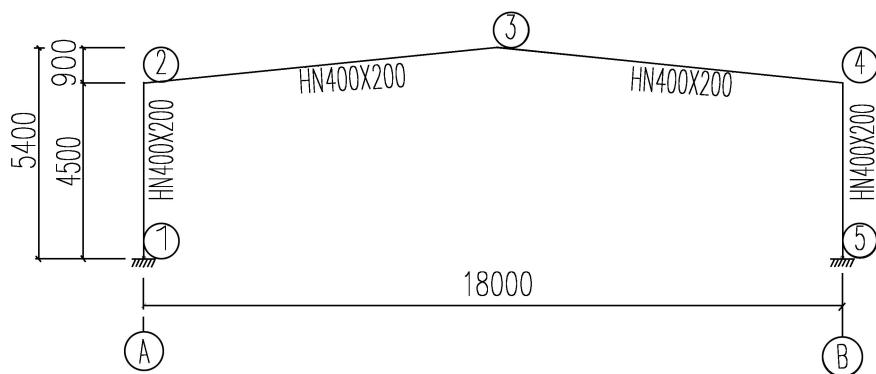


图 7.54 门式钢架

此处选择正常做法，即先建立关键点和线，然后划分网格，加载求解，最后进行结果查看。单元类型选择 **BEAM188** 三维梁单元，单元长度按份进行划分。

7.4.2 求解过程

本节详细阐述该实例的求解过程。

7.4.2.1 定义工作目录及文件名

step 1

启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，如图 7.55 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：**C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 7\7-2**，在 Job Name 栏中输入工作文件名：**Chapter7-2**。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。



可以先在目标文件位置建立工作目录，然后单击 Browse 按钮选择工作目录；也可以通过单击 Browse 按钮选择工作文件名。

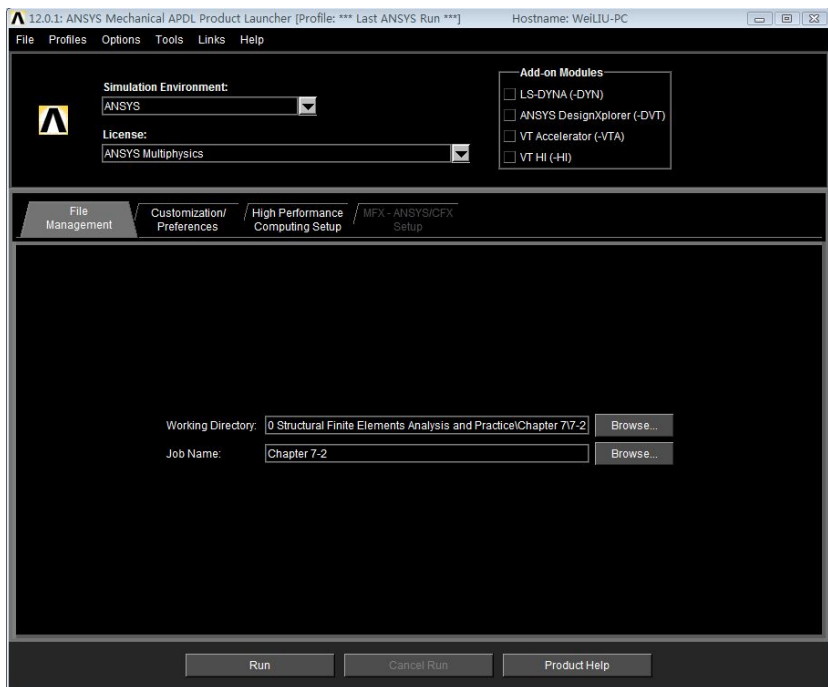


图 7.55 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口

7.4.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1

选择 Main Menu→Preferences 命令,弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框,如图 7.56 所示,在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框,过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项,单击 OK 按钮关闭该对话框。

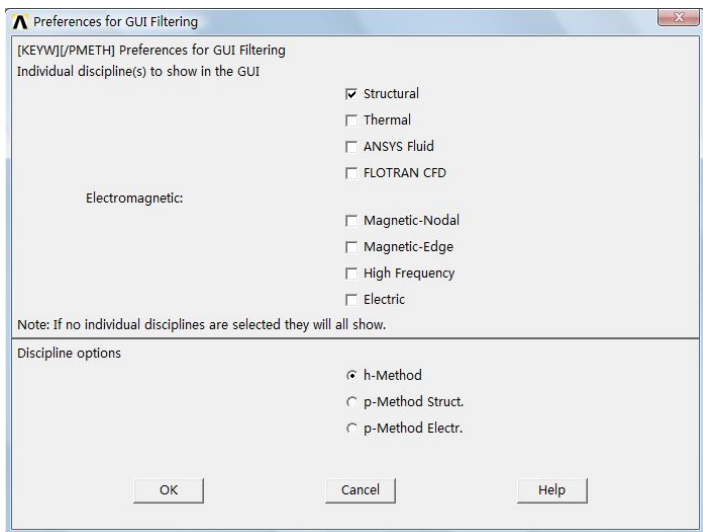


图 7.56 Preferences for GUI Filtering 对话框

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令,弹出 Element Types 对话框,如图 7.57 所示,单击 Add 按钮,弹出 Library of Element Types 对话框,

在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 中的 3D 2 node 188 单元，如图 7.58 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

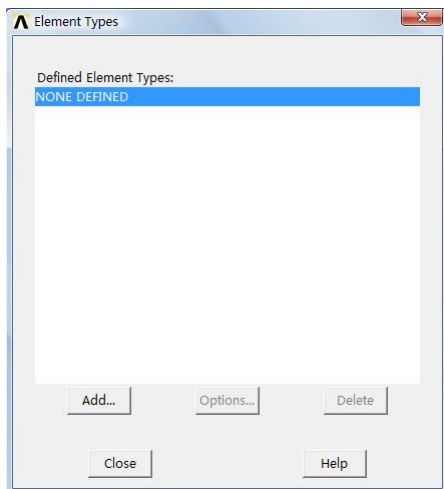


图 7.57 Element Types 对话框

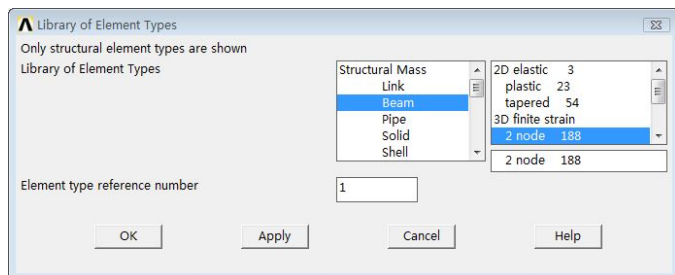


图 7.58 Library of Element Types 对话框

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，如图 7.59 所示，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.1×10^{11} ，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 7.60 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

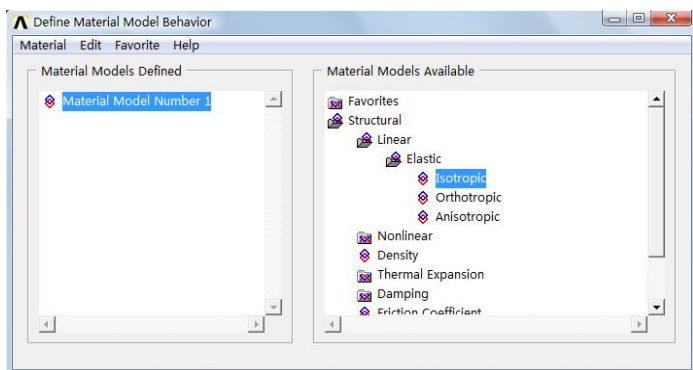


图 7.59 Define Material Model Behavior 对话框

step 4

选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Sections**→**Beam**→**Common Sections** 命令，弹出 **Beam Tool** 对话框，在 **Sub-Type** 下拉列表框中选择工字型截面，在下面的参数栏中输入参数，如图 7.61 所示。单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

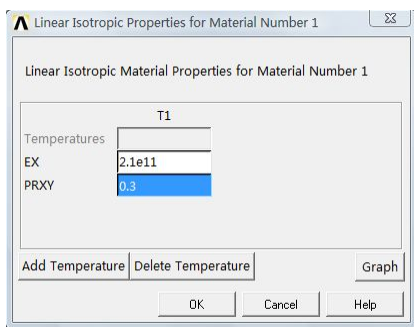


图 7.60 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

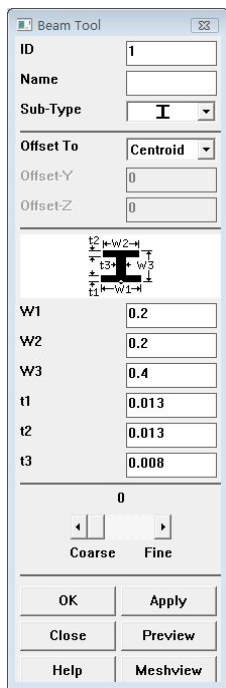



图 7.61 Beam Tool 对话框

step 5

选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。



也可单击  按钮或 **SAVE_DB** 按钮来实现保存操作。

7.4.2.3 创建几何模型

step 1

创建关键点。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Keypoints**→**In Active CS** 命令，弹出 **Create Keypoints in Active Coordinate System** 对话框，在 **NPT Keypoint number** 输入栏中输入 1，在 **X,Y,Z Location in active CS** 输入栏中输入 0、0、0，如图 7.62 所示，单击 **Apply** 按钮建立关键点 1；然后按表 7.9 所示的关键点坐标值建立其他关键点，建立完所有关键点后的结果如图 7.63 所示。

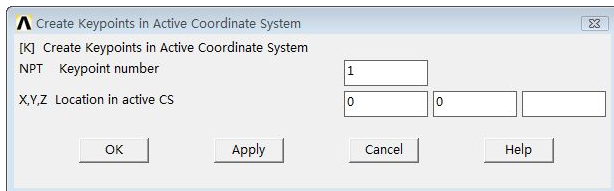


图 7.62 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

表 7.9 关键点坐标值						
关键点号	1	2	3	4	5	6
X 坐标	0	0	9	18	18	9
Y 坐标	0	4.5	5.4	4.5	0	10



图 7.63 建立完所有关键点后的结果

关键点 6 是门式钢架梁的辅助方向点。

step 2

连接关键点，建立线。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line 命令，弹出 Create Straight Line 拾取菜单，如图 7.64 所示，选择关键点 1, 2，单击 Create Straight Line 拾取菜单中的 Apply 按钮，生成直线；再选择关键点 2, 3 生成直线；然后再选择关键点 3, 4 生成直线；最后选择关键点 4, 5 生成直线。单击 OK 按钮，退出 Create Straight Line 拾取菜单。

生成线时，我们单击 Create Straight Line 拾取菜单中的 Apply 按钮来进行确认，也可以直接按鼠标左键来完成此操作，这样将更快捷。

step 3

显示关键点和线的编号。选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，分别选择 KP Keypoint numbers 和 LINE Line numbers 复选框，使其状态由 Off 变为 On，如图 7.65 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Utility Menu→Plot→Lines 命令，此时，ANSYS 图形界面显示的结果如图 7.66 所示。

此操作为显示关键点及线的编号。

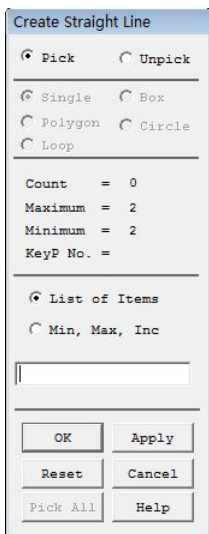


图 7.64 Create Straight Line 拾取菜单

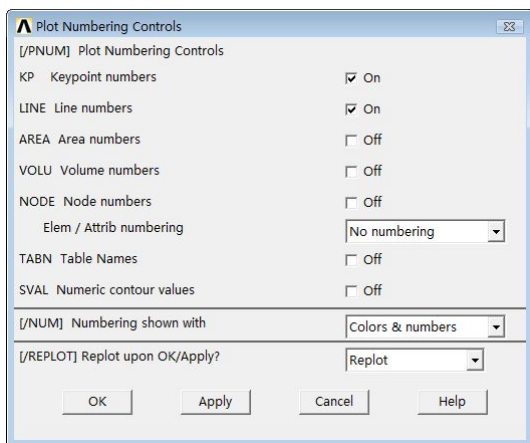


图 7.65 Plot Numbering Controls 对话框

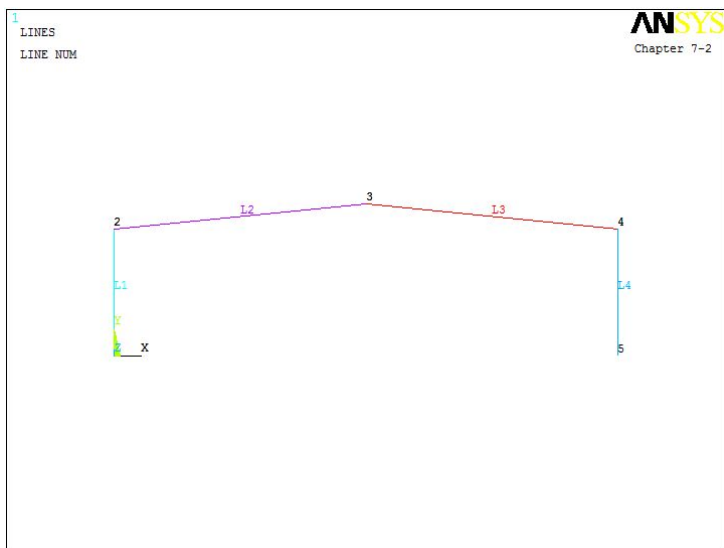


图 7.66 ANSYS 图形界面显示生成线后的结果

step 4

至此，我们已经完成了几何模型的建立，选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

7.4.2.4 划分网格

step 1

设置网格属性。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Meshing Attributes**→**Picked Lines** 命令，弹出 **Line Attributes** 拾取菜单，如图 7.67 所示，用鼠标选择直线 1，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Line Attributes** 对话框，在 **Pick Orientation Keypoint(s)** 栏中选中 **Yes** 复选框，其余选项保持默认设置，如图 7.68 所示，单击 **Apply** 按钮，选择 5 点作为左侧柱的方向点。再用鼠标选择直线 4，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Line Attributes** 对话框，在 **Pick Orientation Keypoint(s)** 栏中选中 **Yes** 复选框，其余选项保持默认设置，单击 **Apply** 按钮，选择 1 点作为右侧柱的方向点。最后用鼠标选择直线 2 和 3，单击 **Apply** 按钮，

弹出 **Line Attributes** 对话框，在 **Pick Orientation Keypoints** 栏中选中 **Yes** 复选框，其余选项保持默认设置，单击 **Apply** 按钮，选择 6 点作为两段梁的方向点。单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

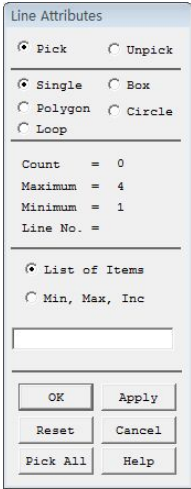


图 7.67 Line Attributes 拾取菜单

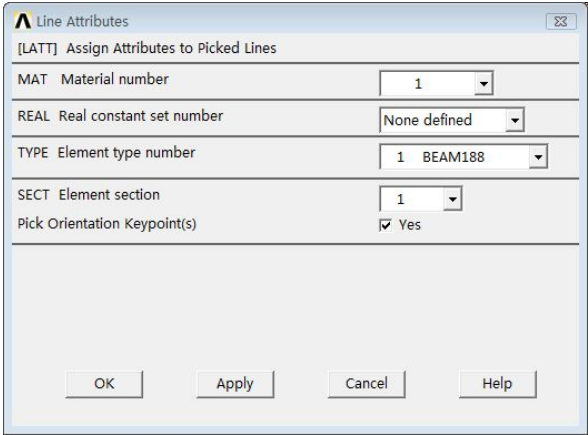


图 7.68 Line Attributes 对话框

step 2 设置划分份数。选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manual Size→Lines→All Lines** 命令，弹出 **Element Sizes on All Selected Lines** 对话框，在 **NDIV No. of element divisions** 输入栏中输入 50，如图 7.69 所示，单击 **OK** 按钮，退出该对话框。

step 3 划分网格。选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines** 命令，弹出 **Mesh Lines** 拾取菜单，如图 7.70 所示，单击 **Pick ALL** 按钮，生成所有单元。

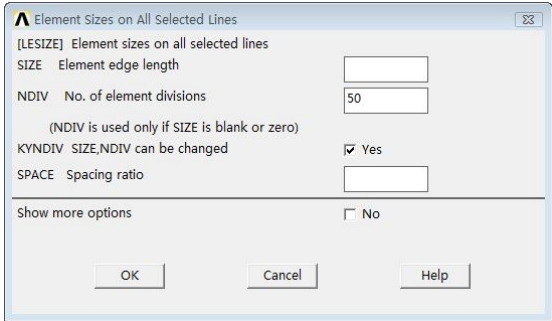


图 7.69 Element Sizes on All Selected Lines 对话框

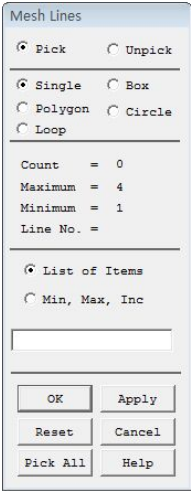



图 7.70 Mesh Lines 拾取菜单

step 4 实体显示单元。选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Style→Size and Shape** 命令，弹出 **Size and Shape** 对话框，选中 **[/ESHAPE] Display of element** 复选框，使其状态从 **Off** 变为 **On**，单击 **OK** 按钮退出该对话框。单击窗口右侧的轴测图形显示按钮，此时 **ANSYS** 图形窗

口的显示结果如图 7.72 所示。

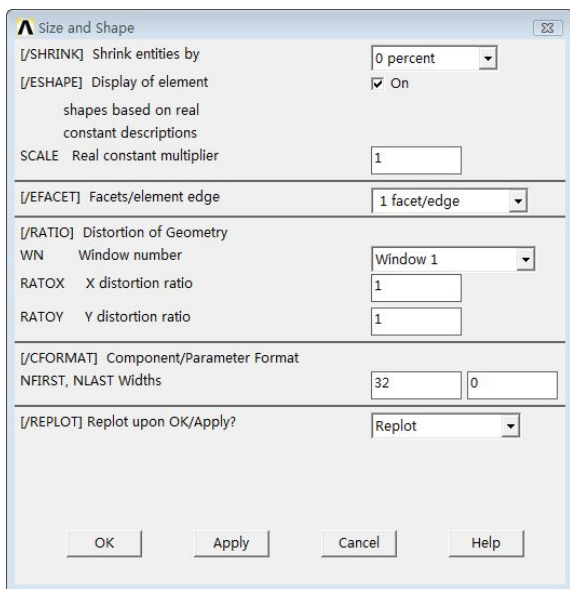


图 7.71 Size and Shape 对话框

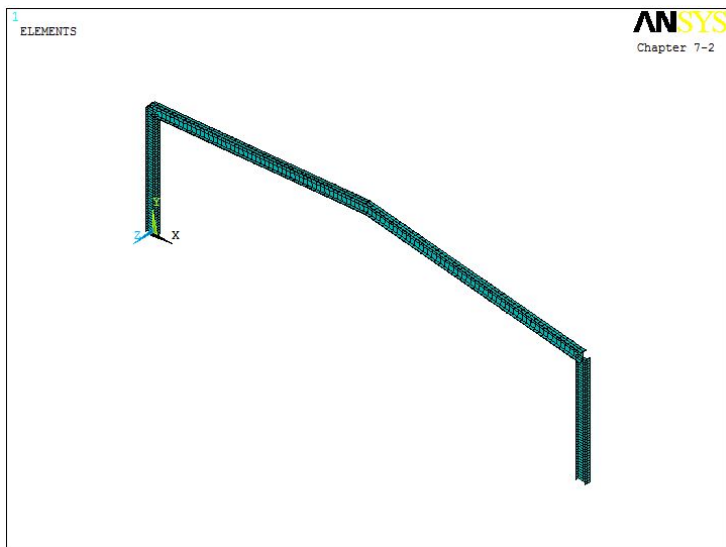


图 7.72 ANSYS 图形窗口显示的实体有限元模型结果

step 5

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令,保存上述操作过程。选择 Main Menu→Finish 命令,退出前处理器。

7.4.2.5 加载求解

step 1

施加约束。选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints 命令,弹出 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单,如图 7.73 所示,用鼠标拾取关键点 1 和 5,单击 Apply 按钮,弹出 Apply U,ROT on KPs 对话框,在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF 选项,如图 7.74 所示,单击 Apply

按钮，对关键点 1 和 5 进行固定约束。

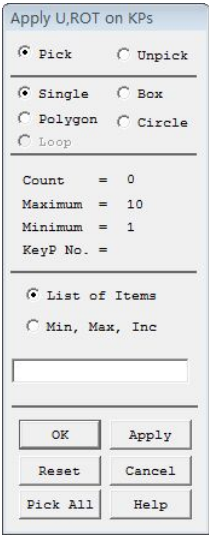


图 7.73 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单

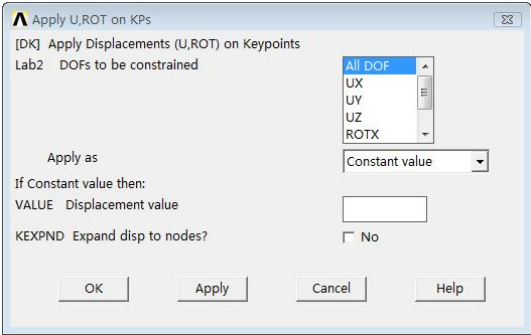


图 7.74 Apply U,ROT on KPs 对话框

step 2 施加载荷。选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On beams 命令，弹出 Apply PRES on Beams 拾取菜单，选中 Min, Max, Inc 单选按钮，在输入栏中输入 51,150,1，如图 7.75 所示，单击 Apply 按钮，弹出 Apply PRES on Beams 对话框，在 Pressure value at node I 和 Pressure value at node J 输入栏中均输入 2000，如图 7.76 所示，单击 OK 按钮退出该对话框。ANSYS 窗口显示的施加约束和载荷后的结果如图 7.77 所示。

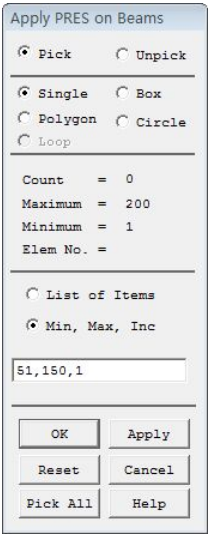


图 7.75 Apply PRES on Beams 拾取菜单

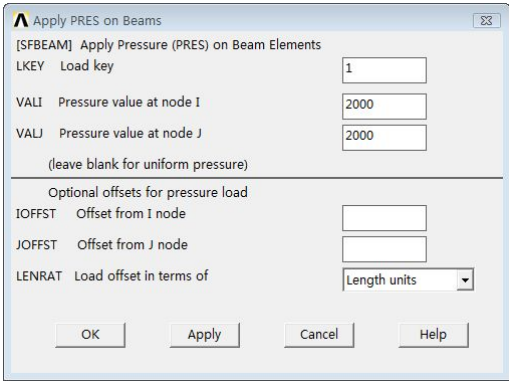


图 7.76 Apply PRES on Beams 对话框

step 3 选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，如图 7.78 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 4 选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对

话框，如图 7.79 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

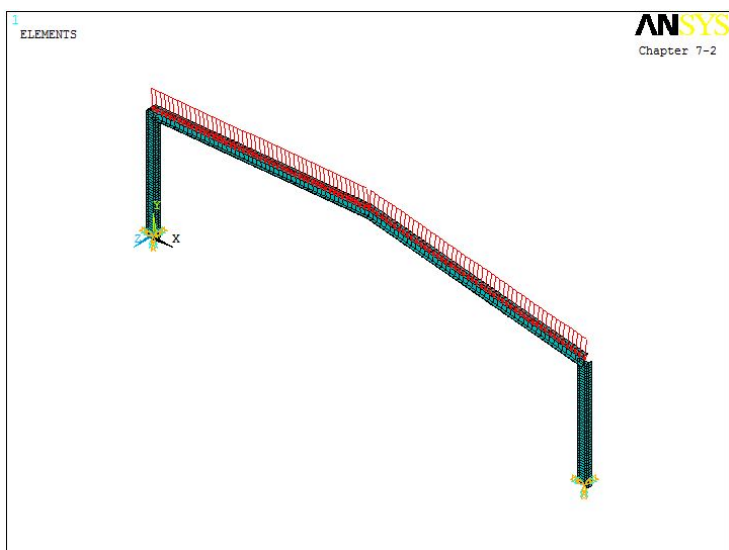


图 7.77 施加约束载荷后的结果

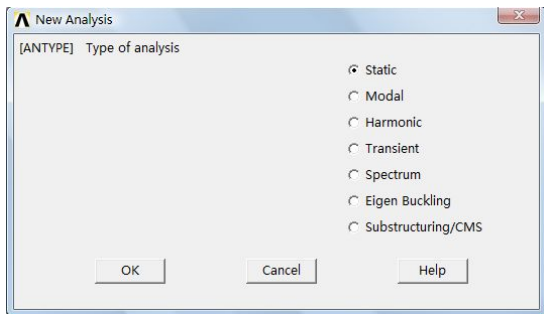


图 7.78 New Analysis 对话框

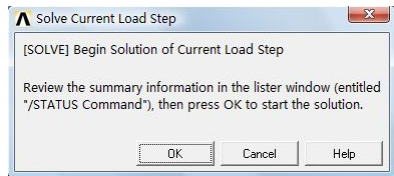


图 7.79 Solve Current Load Step 对话框

step 5

求解结束时，弹出 Note 对话框，如图 7.80 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

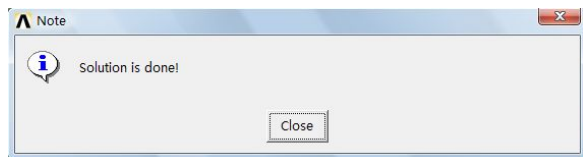


图 7.80 Note 对话框

step 6

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。至此，加载及求解过程结束，下面开始查看和分析结果。

7.4.2.6 查看求解结果

step 1

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undeformed 单选按钮，如图 7.81 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 7.82 所示。

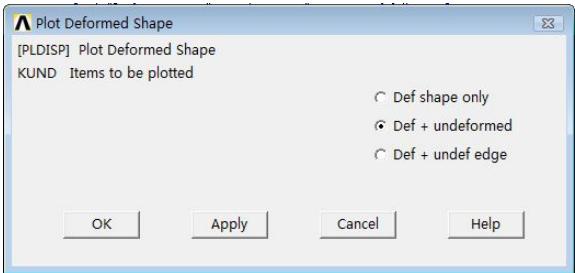


图 7.81 Plot Deformed Shape 对话框

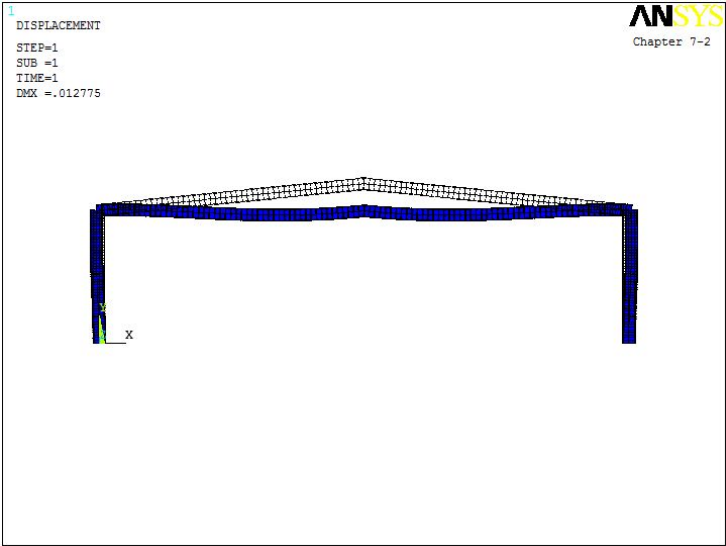


图 7.82 变形后的几何形状和未变形的几何形状

step 2 选择 Main Menu → General Postproc → List Results → Reaction Solu 命令，弹出 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All struc force F 选项，如图 7.83 所示，单击 OK 按钮，显示支座节点反作用力结果列表，如图 7.84 所示。



可根据结构力学的知识验证支座节点反作用力的正确性。

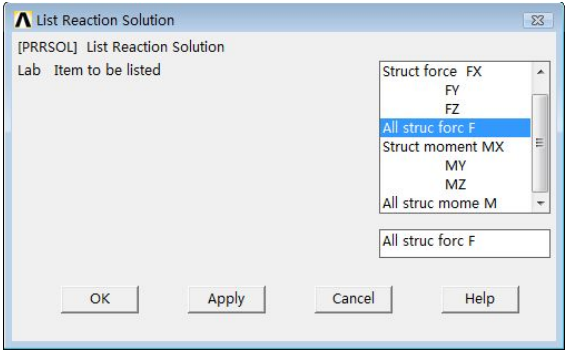


图 7.83 List Reaction Solution 对话框

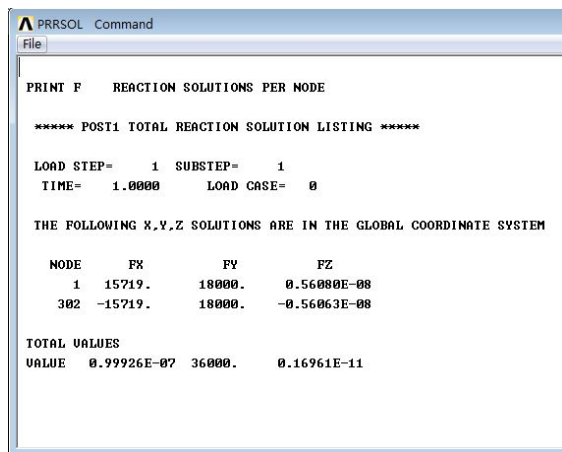


图 7.84 支座节点反作用力结果列表

step 3

选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table 命令, 弹出 Element Table Data 对话框, 如图 7.85 所示, 单击 Add...按钮, 弹出 Define Additional Element Table Items 对话框, 在 User label for item 输入栏中输入 IMOMENT, 在 Item, Comp Results data item 栏的左边下拉列表框中选择 By sequence num 选项, 在右边下拉列表框中选择 SMISC, 选项, 在下面的输入栏中输入 2, 如图 7.86 所示, 单击 Apply 按钮。再次在 User label for item 输入栏中输入 JMOMENT, 在 Item, Comp Results data item 栏的左边下拉列表框中选择 By sequence num 选项, 在右边下拉列表框中选择 SMISC, 选项, 在下面的输入栏中输入 15, 单击 Apply 按钮。重复上述操作, 在 User label for item 输入栏中输入 ISHEAR, 在 Item, Comp Results data item 栏的左边下拉列表框中选择 By sequence num 选项, 在右边下拉列表框中选择 SMISC, 选项, 在下面的输入栏中输入 5, 单击 Apply 按钮。再次在 User label for item 输入栏中输入 JSHEAR, 在 Item, Comp Results data item 栏的左边下拉列表框中选择 By sequence num 选项, 在右边下拉列表框中选择 SMISC, 选项, 在下面的输入栏中输入 18, 单击 OK 按钮。此时, Element Table Data 对话框如图 7.87 所示, 单击 Close 按钮关闭该对话框。

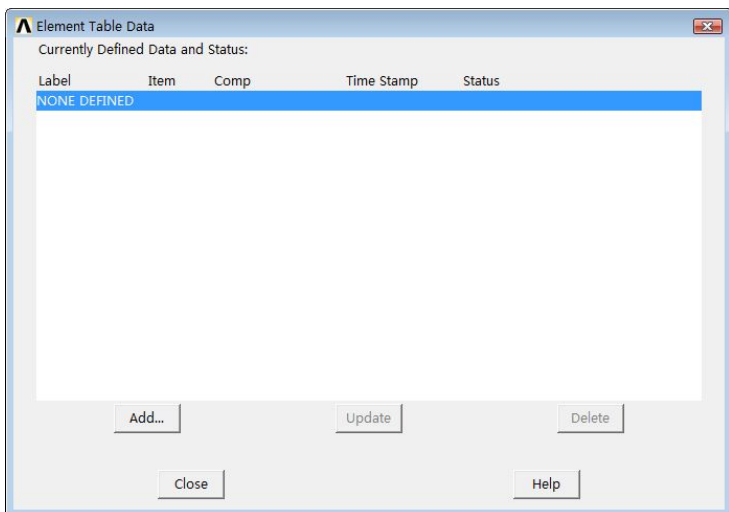


图 7.85 Element Table Data 对话框

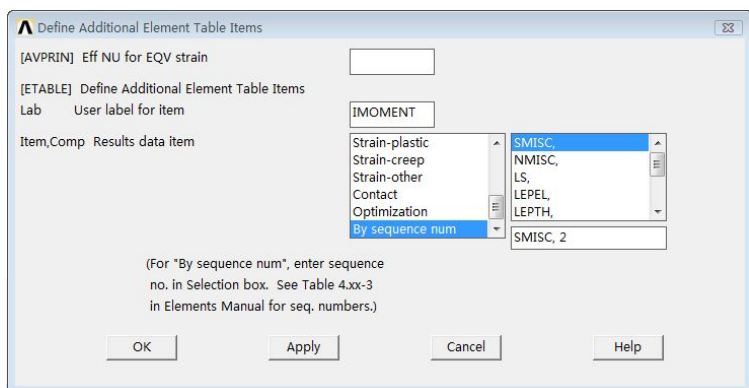


图 7.86 Define Additional Element Table Items 对话框

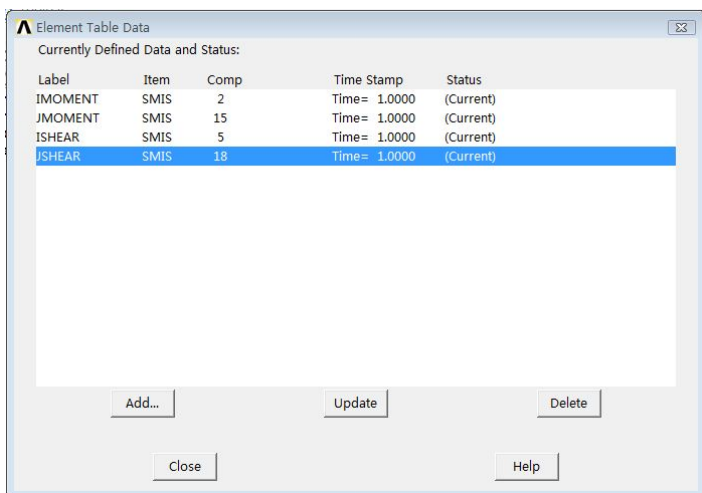


图 7.87 Element Table Data 对话框



该操作为输出 BEAM188 梁单元的弯矩和剪力结果, BEAM188 单元的具体输出设置及参数含义可参考 ANSYS 程序的 BEAM188 单元帮助文件。

step 4

选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→List Element Table 命令, 弹出 List Element Table Data 对话框, 在 Lab1-9 Items to be listed 下拉列表框中选择 IMOMENT, JMOMENT, ISHEAR, JSHEAR 选项, 如图 7.88 所示, 单击 OK 按钮, 弹出 PRETAB Command 列表框, 如图 7.89 所示, 从中可以看出各个单元的弯矩和剪力结果。

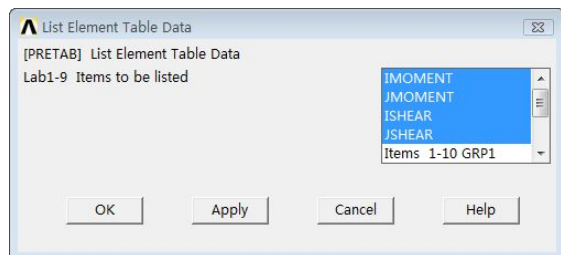


图 7.88 List Element Table Data 对话框

PRETAB Command				
File				
PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT				
***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****				
STAT	CURRENT	CURRENT	CURRENT	CURRENT
ELEM	IMOMENT	JMOMENT	ISHEAR	JSHEAR
1	27127.	27127.	-15719.	-15719.
2	25712.	25712.	-15719.	-15719.
3	24298.	24298.	-15719.	-15719.
4	22883.	22883.	-15719.	-15719.
5	21468.	21468.	-15719.	-15719.
6	20053.	20053.	-15719.	-15719.
7	18639.	18639.	-15719.	-15719.
8	17224.	17224.	-15719.	-15719.
9	15809.	15809.	-15719.	-15719.
10	14394.	14394.	-15719.	-15719.
11	12980.	12980.	-15719.	-15719.
12	11565.	11565.	-15719.	-15719.
13	10150.	10150.	-15719.	-15719.

图 7.89 PRETAB Command 列表框

step 5 绘制弯矩图。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令，弹出 Plot Line-Element Results 对话框，在 LabI Elem table item at node I 下拉列表框中选择 IMOMENT 选项，在 LabJ Elem table item at node J 下拉列表框中选择 JMOMENT 选项，如图 7.90 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 窗口显示的弯矩结果如图 7.91 所示。

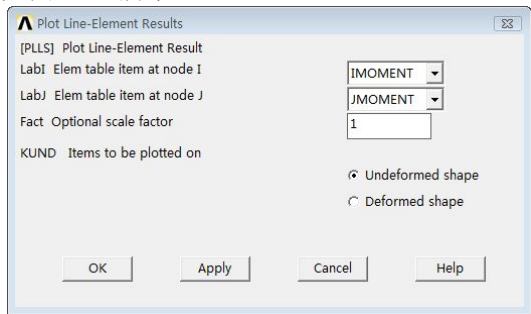


图 7.90 Plot Line-Element Results 对话框

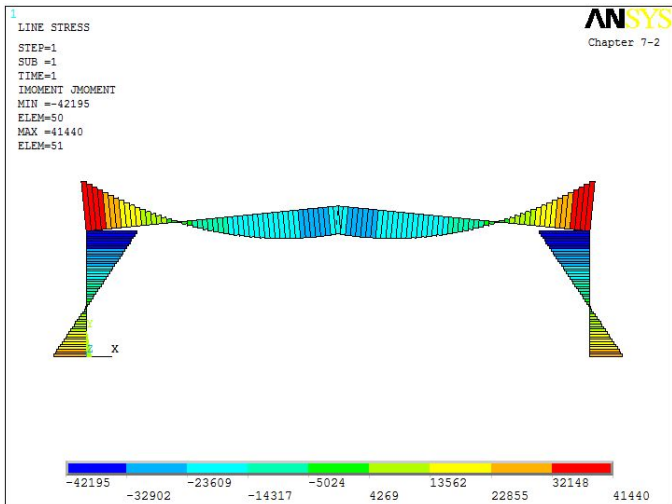


图 7.91 弯矩结果显示

step 6 绘制剪力图。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令，弹出 Plot Line-Element Results 对话框，在 LabI Elem table item at node I 下拉列表框中选择 ISHEAR 选项，在 LabJ Elem table item at node J 下拉列表框中选择 JSHEAR 选项，如图 7.92 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 窗口显示的剪力结果如图 7.93 所示。

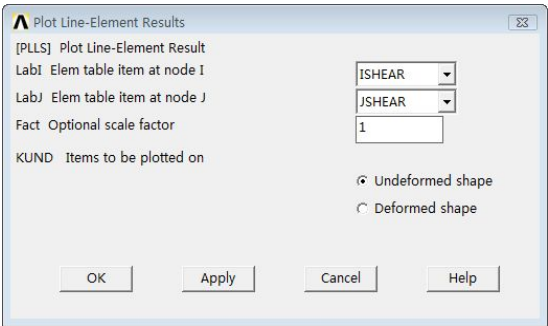


图 7.92 Plot Line-Element Results 对话框

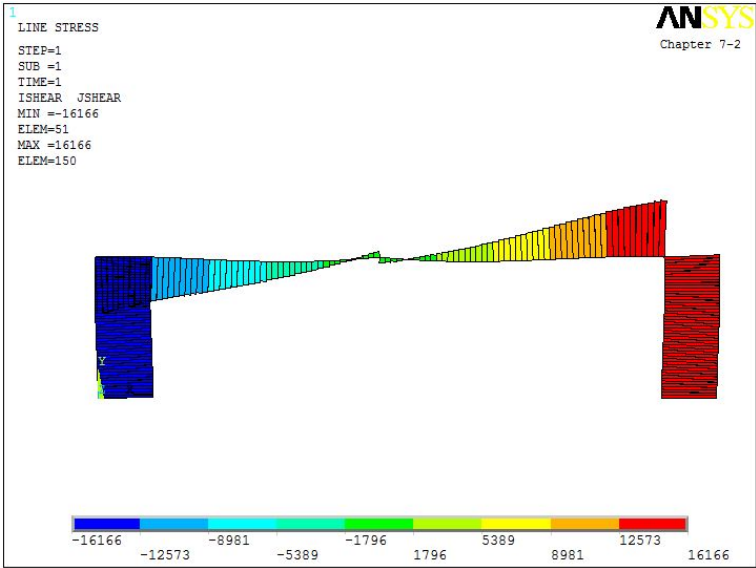


图 7.93 剪力结果显示

step 7 选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，如图 7.94 所示，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

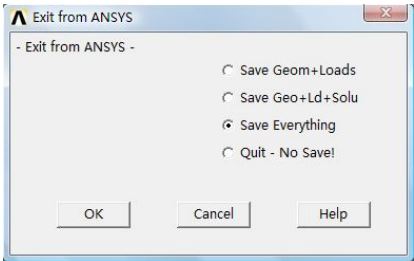


图 7.94 Exit from ANSYS 对话框

7.4.3 命令流

```

/PREP7

ET,1,BEAM188          ! 定义单元类型

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0             ! 定义材料属性
MPDATA,EX,1,,2.1e11
MPDATA,PRXY,1,,0.3

SAVE

SECTYPE, 1, BEAM, I, , 0      ! 定义实常数
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.2,0.2,0.4,0.013,0.013,0.008,0,0,0,0

K,1,,,                ! 建立关键点
K,2,,4.5,,
K,3,9,5.4,,
K,4,18,4.5,,
K,5,18,0,,
K,6,9,10,,

SAVE

LSTR,      1,      2      ! 建立线
LSTR,      2,      3
LSTR,      3,      4
LSTR,      4,      5

CM,_Y,LINE              ! 赋予划分网格属性
LSEL, , , ,      1
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, ,      5, ,1
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

CM,_Y,LINE              ! 赋予划分网格属性
LSEL, , , ,      4
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, ,      1, ,1
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

```



```

CM,_Y,LINE      ! 赋予划分网格属性
LSEL, , , ,      2
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, ,      6, ,1
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

CM,_Y,LINE      ! 赋予划分网格属性
LSEL, , , ,      3
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, ,      6, ,1
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

LESIZE,ALL, , ,50, ,1, , ,1,      ! 划分网格
LMESH, ALL, , ,
SAVE

EPLLOT          ! 实体有限元显示
/ESHAPE,1.0
/VIEW,1,,,1

FINISH          ! 进入求解器
/SOL

DK,1 , ALL, 0 ,      ! 施加约束
DK,5 , ALL, 0 ,

ESEL, S, , , 51, 150, 1,
SFBEAM,all,1,PRES,2000,2000, , , , ,0
ESEL, all,

ANTYPE,0        ! 求解
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH

/POST1          ! 进入后处理
PLDISP,1        ! 查看变形结果
PRRSOL,F        ! 列表显示反力

ETABLE,Imoment,SMISC, 2      ! 将节点弯矩制表
ETABLE,Jmoment,SMISC, 15
ETABLE,Ishear,SMISC, 5

```




```
ETABLE,Jshear,SMISC, 18
```

```
PRETAB, IMOMENT, JMOMENT, ISHEAR, JSHEAR      ! 列表显示单元弯矩剪力
```

```
PLLS, IMOMENT, JMOMENT, 1, 0                    ! 绘弯矩图
```

```
PLLS, ISHEAR, JSHEAR, , 1, 0                    ! 绘剪力图
```

```
FINISH
```

```
! /EXIT,ALL
```

7.5 小结

本章讲述了梁系结构有限元分析的基本过程，介绍了 **ANSYS** 中几种典型梁单元的基本特性，最后以两个工程实例介绍了用 **ANSYS** 程序分析梁系结构的基本方法和操作过程，两个实例均具有典型性，且所涉及的知识点较多，希望能给读者带来举一反三的效果。



第 8 章 ANSYS 板壳结构有限元分析

本章包括

- ◆ 板壳结构有限元分析基本过程
- ◆ ANSYS 中提供的板壳单元简介
- ◆ 实例详解 1：带孔平板结构静力分析
- ◆ 实例详解 2：混凝土圆柱壳结构静力分析

板壳结构包括板结构和壳结构两种类型，它是一种重要的工程结构，被广泛应用于机械、土木及海洋等实际工程中，如各式各样的平台板、楼板、机车箱体、曲面屋顶、穹顶结构等。板结构通常在一个平面内，通常可简化为弹性平面问题；而壳结构通常不在一个平面内，是一种曲面结构，在土木工程中，壳结构多为薄壳结构，即曲面的薄壁结构，如筒壳、圆顶薄壳、双曲扁壳和双曲抛物面壳等，材料大多采用钢筋混凝土。从外观上看，这些薄壳结构形态各异，却有着共同的力学特征。薄壳结构在受到外力作用时，能够把力沿着整个壳体表面向四周均匀传递，使壳体上单位面积所受的力并不大。更为重要的是，在壳体上不存在作用力集中于一个地方的情况。建筑物垮塌不是建筑物的每一处都承受不住力了，而往往是有一处不能承受重压而导致整个建筑物垮掉，所以，薄壳结构的这个特点很重要。因为薄壳结构能够承受很大的压力，所以建筑师们做很大、很薄的屋顶。这样不但能减轻屋顶重量，节约大量材料，而且内部空间可以很大，而且又没有柱子，所以大型建筑（如大厅、体育场馆等）很多首选薄壳结构。

如何对这样一种较为复杂的结构进行分析和设计，从而保证结构的可靠性和安全性？随着计算机的发展，大型有限元程序自然而然就成为首选。本章主要讨论利用 ANSYS 程序进行板壳结构有限元分析的基本方法，介绍板壳单元的基本特性，同时结合工程实例进行操作方法的详细讲解。

8.1 板壳结构有限元分析基本过程

板壳结构的理论基础是板壳力学，读者可参阅相关的理论书籍。下面重点介绍板结构中的弹性平面问题的有限元分析基本思想。

8.1.1 弹性平面问题有限元分析基本思想

在第 6 章和第 7 章对杆系结构、梁系结构进行求解时，将结构看成是一个用有限个节点连接有限个单元的离散系统，然后由单元分析确定单元的结构力学与单元节点位移之间的关系，再由节点的平衡建立结构的节点力与节点位移之间的关系，从而得到以节点位移为待求参数的线性代数方程组。

对于弹性力学平面问题，若也采用与其相同的分析方法，首先要建立与其相似的离散系统。对

杆系结构来说,将杆件交汇点、截面突变点等作为节点来划分单元是很自然的;而对于弹性连续体,却只能人为地将其分割成有限部分,并认为各部分之间仅在有限个点相连。显然,这样做的结果使离散体不同于原连续体。但是,随着划分网格的加密和每一部分尺寸的缩小,两者之间的差异会越来越小。这样做的好处是,我们可以把一个复杂的、用弹性力学的一般方法无法求解解析的连续体问题用前面介绍的方法进行求解。

由于弹性连续体的离散系统与杆系结构的离散系统在形式上是类似的,因此,其分析步骤也类似,即都需进行单元分析和整体分析。由于离散方式不同,在单元分析时又有很大的不同,出现在了杆系结构中没有遇到过的新问题,如收敛性、应力结果的整理等。

8.1.2 平面问题的离散化过程

弹性力学平面问题可分为平面应力问题和平面应变问题。它们都可以只分析结构的一个代表性截面。用有限元法近似分析时,将人为地把所研究的截面分成很多小块,每块为一个单元,单元间只以节点相连。对于平面应力问题,如采用简单三角形单元,从物理上理解,相当于把原来的薄片结构分割成很多三角形小块,再在其顶点用铰链连接起来,并且将各种载荷都等效地加到节点上。以这样一个由有限个元件组成的离散结构来近似代替原来的连续结构,作为有限元计算的力学模型。在载荷作用下,各单元都将发生变形,各节点也将有位移产生。如果上述的近似是合理的,求出各节点的位移后,也就大致了解了原结构截面的位移分布 $\mu(x, y)$ 、 $\nu(x, y)$ 。

在平面结构内,任一节点 i 应有两项位移分量 μ_i 、 ν_i , 相应的节点载荷亦有两项 X_i 、 Y_i , 故节点有两个自由度。节点位移和节点载荷皆可以列阵表示:

$$\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} \mu_i \\ \nu_i \end{Bmatrix} \quad \{\Phi_i\} = \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \end{Bmatrix} \quad (8-1)$$

如果结构的截面被划分了 n 个节点,则共有 $2n$ 个节点位移分量和 $2n$ 个节点载荷分量,整个结构有 $2n$ 个自由度。可用 $\{\delta\}$ 表示整个结构的全部节点位移, $\{\Phi\}$ 表示全部节点载荷。通过单元分析,求得单元刚阵;再迭加为结构整体刚阵 $[K]$,建立起位移法的基本方程 $[K]\{\delta\} = \{\Phi\}$,进行求解。

原来的平面问题是一个连续体变形问题,按弹性理论,应取无限小微体建立微分方程,再解出连续分布的位移 $\mu(x, y)$ 、 $\nu(x, y)$,这可视为一个无限多自由度问题。但是,只有当几何区域很简单,边界条件不复杂时,才能解出结果。按有限元方法,是把原结构分割成很多有限大小的单元(故称有限元法),分析单元受力与变形之间的关系,再形成代数方程组以求解:它是一个有限的 $2n$ 个自由度的问题。对于任意的几何区域和边界条件,这种分析方法都是有效的。

把分析连续体、求解未知函数的问题,转化为解代数方程、求解节点未知量的过程,这就是离散化。把连续的、无限多自由度的问题离散化为各节点的有限个自由度的问题,就可以用计算机来求其数值解。上述平面问题的离散化过程,是直观地按物理的观点把连续结构近似为由元件组成的离散化结构,可称为物理的、直观的离散化。

有了离散化的计算模型,就可以用有限元分析方法进行求解。但是,这里出现了两个明显的问题:

◆ 近似结构中各单元之间只以节点相连,为了与真实问题相近似,应保证受载变形过程中单

元之间的边界线上不裂开也不相“挤入”：即，应该保证在变形过程中，相邻单元的位移在交界边上是一致的、连续的。

- ◆ 对于任意的三角形单元，其节点力与节点位移间的弹性关系是很难确定的，这本身就是一个弹性力学平面问题。这里的单元刚度不像杆件那样，不能简单地直接计算出来，只能设法找出合理的近似结果。

8.1.3 单元刚度分析和结构整体分析

对于各种单元类型，存在如何对单元刚度进行分析，进而对整体结构进行分析的问题，鉴于此处基础理论较深，且在一般的有限元书籍中均有讲解，这里不再展开阐述。

8.2 ANSYS 中提供的板壳单元简介

ANSYS 程序中提供了多种板单元和壳单元，如用于平面结构分析的二次单元 **PLANE2**（6 节点三角形单元）、线性单元 **PLANE42**（具有四边形和三角形选项）、二次单元 **PLANE82**（8 节点四边形单元，具有 6 节点三角形选项），用于壳结构分析的 **SHELL63** 单元（4 节点弹性壳单元）、**SHELL93** 单元（8 节点壳单元，适合于曲面壳体的单元划分）等。本节重点介绍板壳结构中常用的 4 种单元类型，分别是 **PLANE42**、**PLANE82**、**SHELL63** 和 **SHELL93** 单元。

8.2.1 PLANE42 单元特性简介

PLANE42 用于建立二维实体结构模型。该单元既可用做平面单元（平面应力或平面应变），也可用做轴对称单元。该单元有 4 个节点，每个节点有 2 个自由度，分别为 **x** 和 **y** 方向的平移。该单元具有塑性、蠕变、辐射膨胀、应力刚度、大变形以及大应变的能力。**PLANE42** 的几何模型如图 8.1 所示。

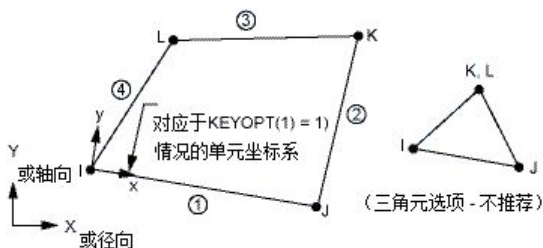


图 8.1 PLANE42 单元的几何模型

图 8.1 给出了 **PLANE42** 单元的几何形状、节点位置和坐标系。单元输入数据包括 4 个节点、一个厚度（仅当 **KEYOPT(3)=3** 时）和正交异性材料特性。正交异性材料的方向与单元坐标系方向一致。压力可以作为单元边界上的面载荷输入，如图 8.1 中带圆圈的数字所示。正压力指向单元内部。可以输入温度和流量作为单元节点处的体载荷。节点 1 处的温度 **T(1)** 默认为 **TUNIF**。如果不给出其他节点处的温度，则默认其等于 **T(1)**。对于平面问题，除了 **KEYOPT(3) = 3** 的情况外，该单元如有节点力，应输入厚度方向每单位长度的力值；对轴对称问题应输入整个圆周（360°）的力值。**KEYOPT(2)** 用于包含或支持额外的位移形状。

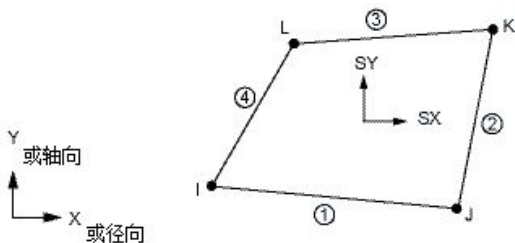
表 8.1 给出了 **PLANE42** 单元的输入数据汇总结果。

表 8.1 PLANE42 单元中输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	PLANE42
节点	I, J, K, L
自由度	UX, UY
实常数	None, if KEYOPT (3) = 0, 1, 2 Thickness, if KEYOPT (3) = 3
材料特性	EX, EY, EZ, (PRXY, PRYZ, PRXZ or NUXY, NUYZ, NUXZ), ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, DAMP
面载荷	压力——face 1 (J-I), face 2 (K-J), face 3 (L-K), face 4 (I-L)
体载荷	温度——T(I), T(J), T(K), T(L) 流量——FL(I), FL(J), FL(K), FL(L)
特点	塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形、大应变、单元生死、自适应下降
KEYOPT(1)	0——单元坐标系平行于整体坐标系 1——单元坐标系建于单元的 I-J 边上
KEYOPT(2)	0——包含过大位移形状 1——抑制过大位移形状
KEYOPT(3)	0——平面应力 1——轴对称 2——平面应变 (Z 向应变 = 0.0) 3——带有厚度输入的平面应力
KEYOPT(5)	0——基本单元解答 1——对所有积分点重复基本解答 2——节点应力解答
KEYOPT(6)	0——基本单元解答 1, 面 I-J 的解答 2——面 I-J、K-L 的解答 (仅适用于线性材料) 3——积分点的非线性解答 4——具有非 0 载荷的面的解答
KEYOPT(9)	0——缺省, 用户没有定义初始应力 1——读入由用户子程序提供的初始应力

PLANE42 单元的输出图如图 8.2 所示，其求解输出的节点位移包括在全部节点解中，其他输出信息如表 8.2 所示。其中，第一列给出了各输出项的名称，用命令 **ETABLE (POST1)** 及 **ESOL (POST26)** 可定义这些变量，用于查询，第二列是具体的含义，第三列表示某一变量值是否在输出文件中给出，第四列表示某一变量值是否在结果文件中给出。无论是第三列还是第四列，“Y”表示可以输出，列中的具体数值则表示在满足特定条件时才输出，而“—”则表示不输出。

详细的单元介绍请参阅 ANSYS 自带的帮助文件。



所示应力方向对应于 KEYOPT(1) = 0

图 8.2 PLANE42 单元输出图

表 8.2 PLANE42 单元的输数据定义列表

名称	定义	.out	.rst
EL	单元号	Y	Y
NODES	节点- I, J, K, L	Y	Y
MAT	材料号	Y	Y
THICK	平均厚度	Y	Y
VOLU	体积	Y	Y
XC, YC	结果显示点位置	Y	3
PRES	压力, P1 在节点 J, I; P2 在 K, J; P3 在 L, K; P4 在	Y	Y
TEMP	温度 T(I), T(J), T(K), T(L)	Y	Y
FLUEN	流量 FL(I), FL(J), FL(K), FL(L)	Y	Y
S: X, Y, Z, XY	应力 (对平面应力单元 SZ = 0.0)	Y	Y
S: 1, 2, 3	主应力	Y	-
S: INT	应力强度	Y	-
S: EQV	当量应力	Y	Y
EPEL: X, Y, Z, XY	单元的弹性应变	Y	Y
EPEL: 1, 2, 3	单元的弹性主应变	Y	-
EPEL: EQV	单元的当量弹性应变 [4]	-	Y
EPth: X, Y, Z, XY	单元的平均热应变	Y	Y
EPth: EQV	单元的当量热应变 [4]	-	Y
EPPL: X, Y, Z, XY	单元的塑性应变	1	1
EPPL: EQV	单元的当量塑性应变 [4]	-	1
EPCR: X, Y, Z, XY	单元的蠕变应变	1	1
EPCR: EQV	单元的当量蠕变应变 [4]	-	1
EPSW	单元的辐射膨胀应变	1	1
NL: EPEQ	节点的当量塑性应变	1	1
NL: SRAT	节点的真实应力与屈服面应力之比	1	1

(续表)

名称	定义	.out	.rst
NL: SEPL	节点在应力-应变曲线上的当量应力	1	1
NL: HPRES	节点静水压力	-	1
FACE	面标号	2	2
EPEL (PAR, PER, Z)	面弹性应变 (平行, 垂直, Z 向或环向)	2	2
TEMP	面平均温度	2	2
S (PAR, PER, Z)	面应力 (平行, 垂直, Z 向或环向)	2	2
SINT	面应力强度	2	2
SEQV	面当量应力	2	2
LOCI: X, Y, Z	积分点位置	-	Y

说明:

1. 非线性结果, 只有在单元为非线性材料特性时才输出。
2. 面输出 (如果 KEYOPT(6) 为 1, 2 或 4)。
3. 仅用于 *GET 命令, 给出单元中心处结果。
4. 当量应变使用有效泊松比时, 对于弹性和热问题, 该值由用户给出 (MP, PRXY 命令); 对于塑性和蠕变问题, 该值为 0.5。

8.2.2 PLANE82 单元特性简介

PLANE82 是 PLANE42 单元的高阶版本。对于四边形和三角形混合格网, 该单元有较高的结果精度, 可以适应不规则形状而较少损失精度。该单元具有一致位移形状函数, 能很好地适应曲线边界。该单元有 8 个节点, 每个节点有 2 个自由度, 分别为 x 和 y 方向的平移, 既可用做平面单元, 也可用做轴对称单元。该单元具有塑性、蠕变、辐射膨胀、应力刚度、大变形以及大应变的能力。PLANE82 单元的几何模型如图 8.3 所示。

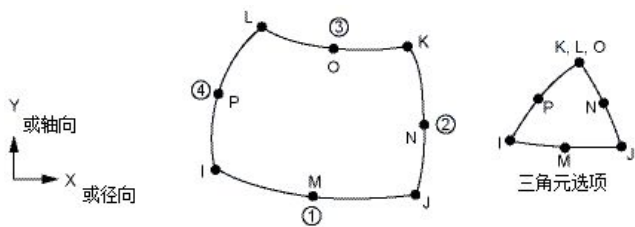


图 8.3 PLANE82 单元的几何模型

图 8.3 给出了 PLANE82 单元的几何形状、节点位置和坐标系。将节点 K, L 和 O 定义为同一节点可以形成三角形单元。除了节点外, 单元输入数据还包括一个厚度 (TK) (仅对平面应力问题) 和正交异性材料特性。正交异性材料的方向与单元坐标系方向一致。压力可以作为单元边界上的面载荷输入, 如图 8.3 中带圆圈的数字所示。正压力指向单元内部。可以输入温度和流量作为单元节点处的体载荷。节点 I 处的温度 $T(I)$ 默认为 TUNIF。如果不给出其他节点处的温度, 则它们默认等于 $T(I)$ 。如果给出了所有角节点的温度, 各中间节点的温度默认为其相邻角节点温度的平均值。

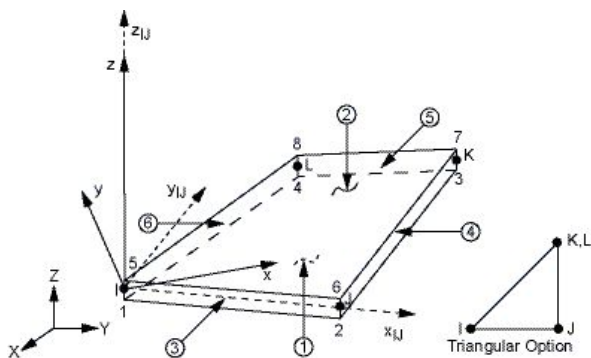
对于任何其他的温度输入方式，未给定的温度默认为 TUNIF。

其余的输入参数信息和输出参数信息可参阅 ANSYS 自带的帮助文件。

8.2.3 SHELL63 单元特性简介

SHELL63 单元是一种 4 节点弹性壳单元，每个节点具有 6 个自由度，即 3 个方向的线位移和 3 个方向的转角位移，如图 8.4 所示。SHELL63 单元可以同时承受面内、外的载荷，同时具有壳单元算法和膜单元算法，该单元还考虑了应力刚化效应及大变形效应。使用该单元时，有如下几条注意事项。

- ◆ 壳单元的面积不能为 0。
- ◆ 不允许单元厚度为零或者角点减小为零的情况。
- ◆ 在壳单元组合中，只要每个单元不超过 15 度，可很好地产生一个曲边壳面。



其中： x_{IJ} = 没有定义单元坐标系时的 X 轴

x = 定义了单元坐标系时的 X 轴

图 8.4 SHELL63 单元的几何模型

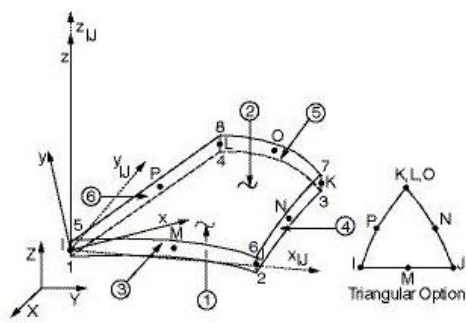
SHELL63 单元的输入参数信息和输出参数信息可参阅 ANSYS 自带的帮助文件，此处不详细阐述。

8.2.4 SHELL93 单元特性简介

SHELL93 单元是 8 节点结构壳单元，特别适合于曲壳模型。该单元的每个节点都具有 6 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和沿节点坐标系 X、Y、Z 轴的转动。变形在两个方向上都是二次的。单元具有塑性、应力刚化、大变形以及大应变的能力。单元 SHELL93 的几何形状、节点位置及坐标系如图 8.5 所示。

单元定义需要 8 个节点、4 个厚度及正交各向异性材料特性。中间节点不能脱离单元。当节点 K、L、O 的节点号定义为相同时，四边形单元即可退化成三角形单元。正交各向异性的材料特性的方向与单元坐标系一致。单元的 X、Y 轴位于单元平面内，X 轴可以绕 Y 轴转动一个角度 THETA (度数)。该单元可以变厚度。输入几个角节点的厚度后，单元厚度可以认为是沿整个单元面平滑变化。中间节点处的厚度取相邻角节点厚度的均值。如果单元等厚度，此时仅需输入 TK(I) 即可；如果单元变厚，则 4 个厚度必须全部给定。当任意一个壳单元的总厚度大于曲率半径的两倍时，ANSYS

将发出一个错误信息；当总厚度小于两倍但大于 1/5 曲率半径时，ANSYS 将发出一个警告信息。压力可以作为表面载荷输入，如图 8.5 中以圆圈显示的数字所示。载荷以单元受压为正。边界压力输入值为单位长度上的力。温度可以作为单元的体积力作用在单元的“角点”——伪节点（1-8）上，第一个角点温度 T1 默认为 TUNIF，如果所有其他角点的温度均未指定，则均默认为 T1；如果只指定了 T1 和 T2，T1 代表 T1、T2、T3、T4，T2 代表 T5、T6、T7、T8；如有其他输入格式，未指定的温度均默认为 TUNIF。



其中：x_{IJ}=没有定义单元坐标系时的X 轴
x=定义了单元坐标系时的X 轴

图 8.5 SHELL93 单元的几何模型

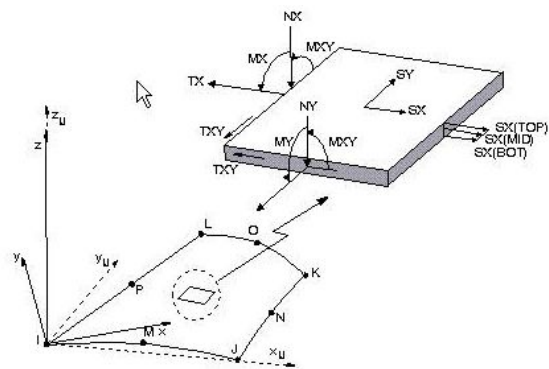
SHELL93 单元的实常数如表 8.3 所示。

表 8.3 SHELL93 单元的实常数

序号	名称	描述
1	TK (I)	结点 I 处的壳厚度
2	TK (J)	结点 J 处的壳厚度
3	TK (K)	结点 K 处的壳厚度
4	TK (L)	结点 L 处的壳厚度 L
5	THETA	单元 X 轴旋转角
6	ADMSUA	附加质量/单位面积

SHELL93 单元的输出图如图 8.6 所示，其求解输出的节点位移包括在全部节点解中，其他输出信息如表 8.4 所示。其中，第一列给出了各输出项的名称，用命令 ETABLE(POST1)及 ESOL(POST26)可定义这些变量，用于查询，第二列是具体的含义，第三列表示某一变量值是否在输出文件中给出，第四列表示某一变量值是否在结果文件中给出。无论是第三列还是第四列，“Y”表示可以输出，具体数值则表示在满足特定条件时才输出，而“—”则表示不输出。

详细的单元介绍请参阅 ANSYS 自带的帮助文件。



其中：x_{IJ}=没有定义单元坐标系时的X 轴
x=定义了单元坐标系时的X 轴

图 8.6 SHELL93 单元输出图

表 8.4 SHELL93 单元的输出数据定义列表

名称	定义	. ou t	. rs t
EL	单元号	Y	Y
NODES	节点 I, J, K, L, M, N, O, P	Y	Y
MAT	材料号	Y	Y
THICK	平均厚度	Y	Y
VOLU:	体积	Y	Y
XC, YC, ZC	结果输出点位置	Y	3
PRES	P1 在节点 I, J, K, L; P2 在 I, J, K, L; P3 在 J, I; P4 在 K, J; P5 在 L, K; P6 在 I, L	Y	Y
TEMP	温度 T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8	Y	Y
LOC	顶面, 中面, 底面, 或积分点的位置	1	1
S: X, Y, Z, XY, YZ, XZ	应力	1	1
S: 1, 2, 3	主应力	1	1
S: INT	应力强度	1	1
S: EQV	等效应力	1	1
EPEL: X, Y, Z, XY, YZ, XZ	弹性应变	1	1
EPEL: 1, 2, 3	主应力	1	1
EPEL: EQV	等效弹性应变[4]	-	1
EPth: X, Y, Z, XY, YZ, XZ	平均温度应变	Y	Y
EPth: EQV	等效温度应变[4]	-	Y
EPPL: X, Y, Z, XY, YZ, XZ	平均塑性应变	2	2

EPPL: EQV	等效塑性应变[4]	-	2
EPCR: X, Y, Z, XY, YZ, XZ	平均蠕变应变 (X, Y, Z, XY, YZ, XZ)	2	2
EPCR: EQV	等效蠕变应变[4]	-	2
EPSW:	膨胀应变	-	2

(续表)

名称	定义	.out	.rst
NL: EPEQ	平均等效塑性应变	2	2
NL: SRAT	节点的真实应力与屈服面应力之比	2	2
NL: SEPL	从应力应变曲线得到的平均等效应力	2	2
T(X, Y, XY)	平面内单元力 X, Y, XY	Y	Y
M(X, Y, XY)	单元弯矩 X, Y, XY	Y	Y
N(X, Y)	平面外单元剪力 X, Y	Y	Y

说明:

- 1. 这些应力结果按单元顶面、中面和底面分别输出 (如果 KEYOPT(5) = 1, 也可按所有积分点输出)。
- 2. 如果单元是非线性材料, 则按单元顶面、中面和底面输出非线性结果。
- 3. 只有在质心处用 *GET 命令时可用。
- 4. 等效应变取用实际的泊松比; 对于弹性问题和热力学问题, 此值由 (MP, PRXY) 指定; 对塑性和蠕变问题, 此值取 0.5。

8.3 板结构有限元分析实例详解 1: 带孔平板结构静力分析

本节介绍带孔平板结构静力分析问题, 同时介绍布尔操作的基本用法。

8.3.1 问题描述与分析

有孔的矩形平板, 左侧边缘固定, 长 400mm, 宽 200 mm, 厚度为 10 mm, 圆孔在板的正中心, 半径为 40 mm, 左侧全约束, 右侧边缘均布应力 1MPa, 如图 8.7 所示。求板的变形、位移及应力变化情况 (材料的材料属性为: 弹性模量为 300000 MPa, 剪切模量为 0.31)。

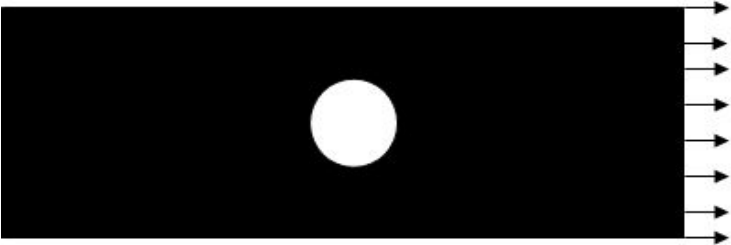


图 8.7 带孔的矩形平板

由于小孔处边缘不规则, 本例采用 PLANE82 高阶平面单元进行分析。

8.3.2 求解过程



8.3.2.1 定义工作目录及文件名

step 1

启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口, 如图 8.8 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品, 在 Working Directory 输入栏中输入工作目录: C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 8\8-1, 在 Job Name 栏中输入工作文件名: Chapter8-1。以上参数设置完毕后, 单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

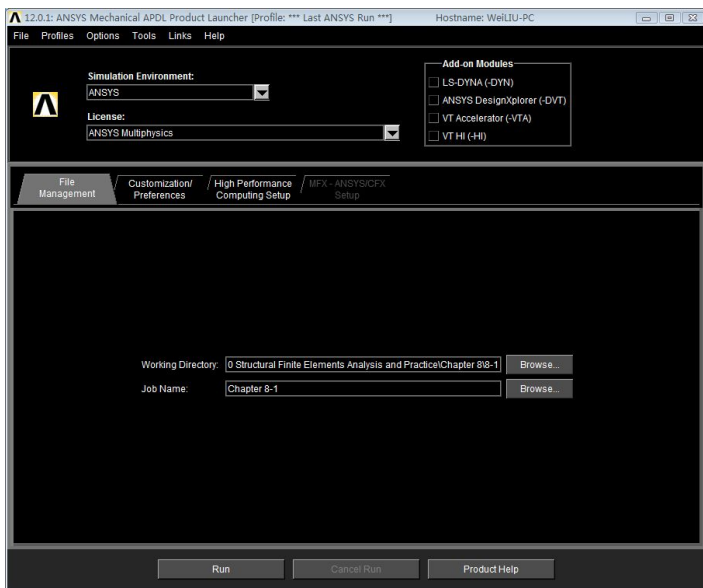


图 8.8 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口



可以先在目标文件位置建立工作目录, 然后单击 Browse 按钮选择工作目录; 也可以通过单击 Browse 按钮来选择工作文件名。

8.3.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1

选择 Main Menu→Preferences 命令, 弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框, 如图 8.9 所示, 在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框, 过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

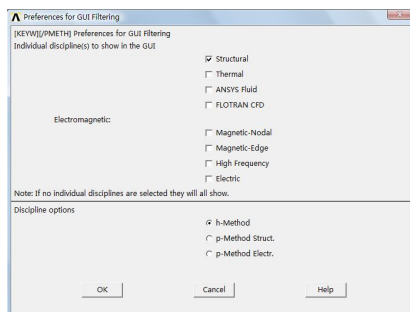


图 8.9 Preferences for GUI Filtering 对话框



step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，如图 8.10 所示。单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid 中的 Quad 8node 82 单元，如图 8.11 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Element Types 对话框中的 Options 按钮，弹出 PLANE 82 element type options 对话框，在 Element behavior K3 下拉列表框中选择 PLANE strs w/thk 选项，如图 8.12 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

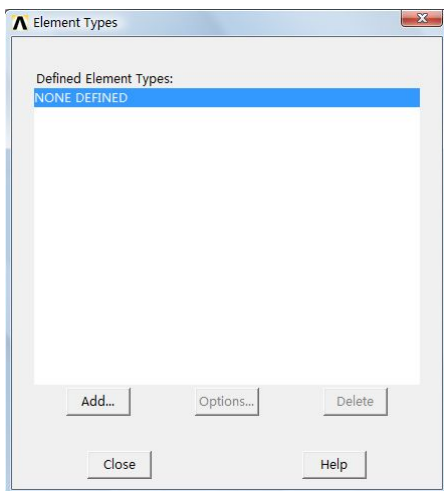


图 8.10 Element Types 对话框

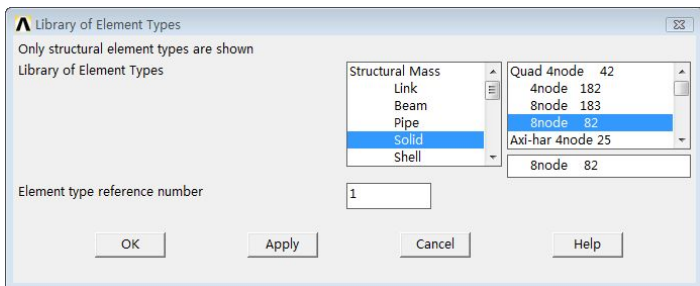


图 8.11 Library of Element Types 对话框

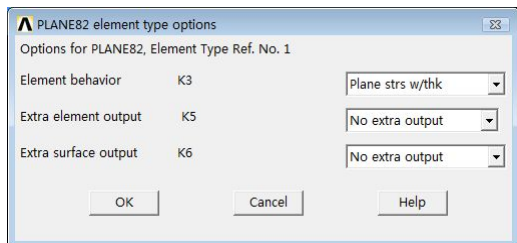


图 8.12 PLANE82 element type options 对话框



PLANE82 是 8 节点的四边形单元，是平面 4 节点 PLANE42 的高阶形式，更适合有曲线边界的模型。对于本问题，我们需要有厚度的平面应力单元，所以选择了 PLANE82



单元。在 PLANE82 选项设置窗口中选择 PLANE strs w/thk 选项使得我们可以设置板的厚度。

step 3

设置材料属性。选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，如图 8.13 所示，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 300000，在 PRXY 输入栏中输入 0.31，如图 8.14 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

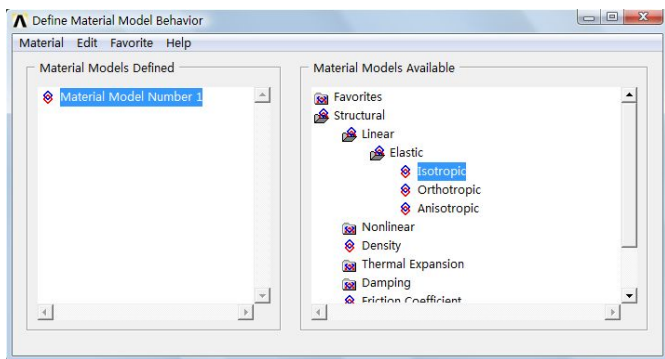


图 8.13 Define Material Model Behavior 对话框

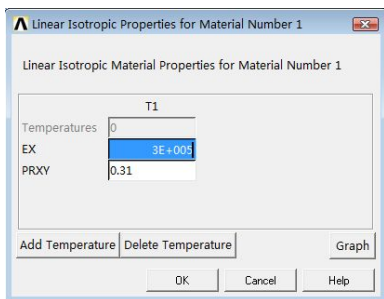


图 8.14 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 4

设置实常数。选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Real Constants 对话框，如图 8.15 所示，单击 Add 按钮，弹出 Real Constant Set Number 1, for PLANE82 对话框，在 Thickness THK 输入栏中输入 10，如图 8.16 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Real Constants 对话框。

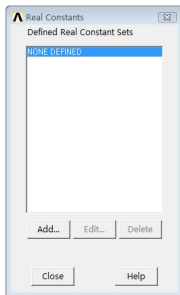


图 8.15 Real Constants 对话框

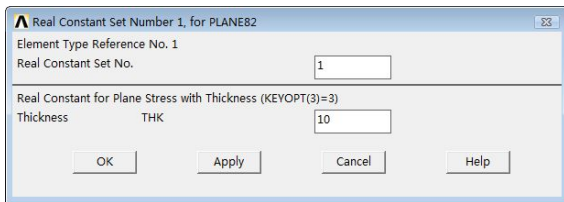


图 8.16 Real Constant Set Number 1, for PLANE82 对话框



step 5 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。



也可单击 按钮或 SAVE_DB 按钮来实现保存操作。

8.3.2.3 创建几何模型

step 1 本例不采取由点建面的方式，而是采用菜单操作方式直接创建矩形面。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Area→Rectangle→By Dimensions 命令，弹出 Create Rectangle by Dimensions 对话框，输入矩形的相关参数，如图 8.17 所示。单击 OK 按钮，将创建一个矩形，其左下角坐标为 (0, 0)，右上角坐标为 (400, 200)，如图 8.18 所示。

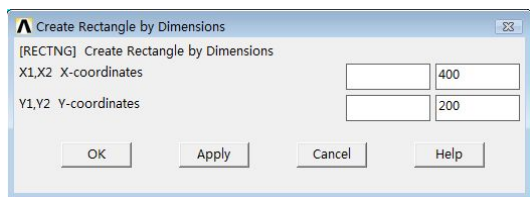


图 8.17 Create Rectangle by Dimensions 对话框

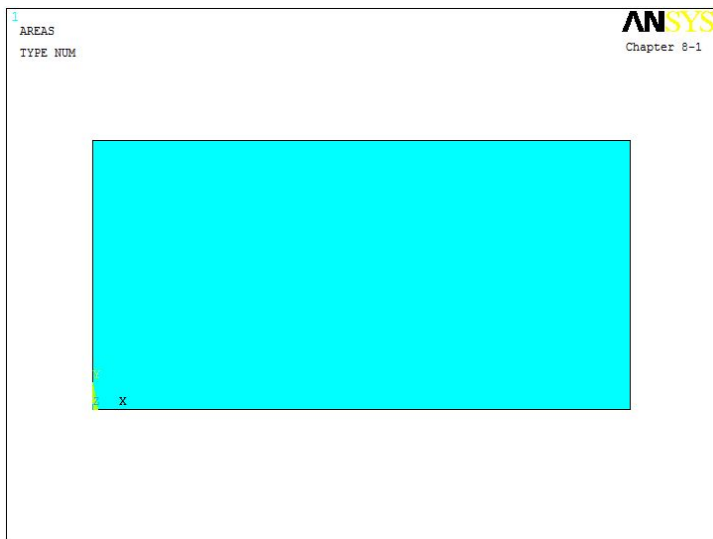


图 8.18 创建矩形后的结果

step 2 创建圆。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Area→Rectangle→By Dimensions 命令，弹出 Solid Circular Area 对话框，输入圆的相关参数，如图 8.19 所示。单击 OK 按钮，将创建一个圆，圆心坐标为 (200, 100)，半径为 40。

step 3 利用布尔操作中的减操作从矩形中减去圆。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Areas 命令，弹出 Subtract Areas 拾取菜单，如图 8.20 所示。用鼠标选取基本面矩形（尽量选择边上），单击 Apply 按钮，再用鼠标选择要被减的圆形，单击 Subtract Areas 拾取菜单中的 OK 按钮，完成减操作，生成的 ANSYS 图形结果如图 8.21 所示。

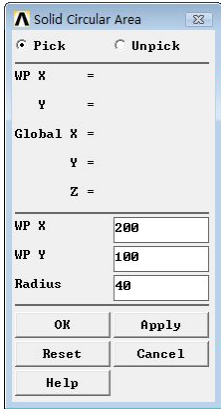


图 8.19 Solid Circular Area 对话框

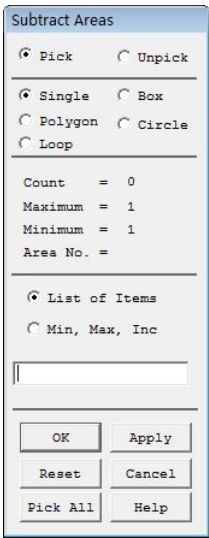


图 8.20 Subtract Areas 拾取菜单

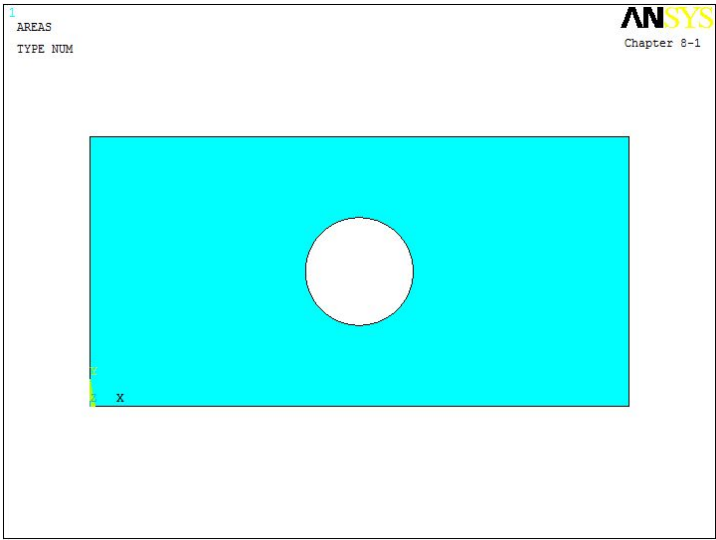


图 8.21 减操作完成后的图形结果

step 4 至此，我们已经完成了带孔矩形板几何模型的建立，选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

8.3.2.4 划分网格

step 1 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**Manual Size**→**Areas**→**All Areas** 命令，弹出 **Element Sizes on All Selected Areas** 对话框，如图 8.22 所示。指定网格边长为 5，至于 5 是否合适，可以根据划分网格的大小和计算结果是否收敛来继续调整。

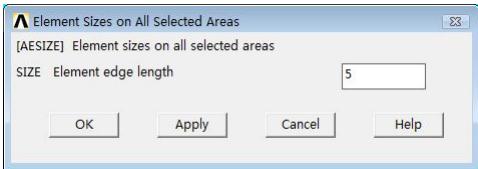


图 8.22 Element Sizes on All Selected Areas 对话框

step 2 划分网格。选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free** 命令，弹出 **Mesh Areas** 拾取菜单，如图 8.23 所示，选择需要划分网格的面，对其进行网格划分，结果如图 8.24 所示。

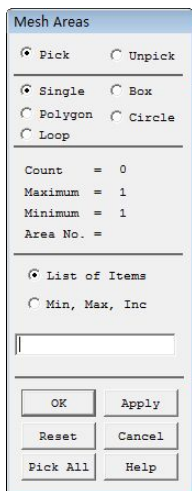


图 8.23 Mesh Areas 拾取菜单

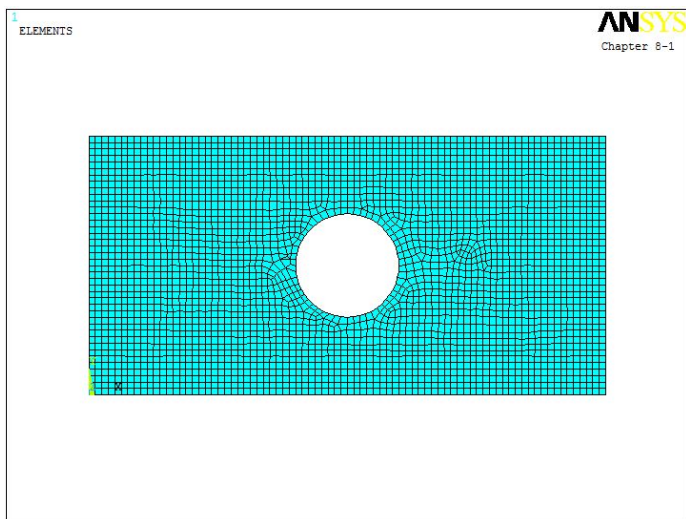


图 8.24 划分网格后的结果

step 3 至此，我们已经完成了带孔矩形板有限元模型的划分，选择 **Utility Menu→File→Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

8.3.2.5 加载求解

step 1 对平板的左侧边缘进行固定约束。选择 **Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines** 命令，弹出 **Apply U,ROT on Lines** 拾取菜单，如图 8.25 所示。用鼠标拾取最左侧的边，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Apply U,ROT on Lines** 对话框，在 **Lab2 DOFs to be constrained** 列表框中选择 **ALL DOF** 选项，如图 8.26 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

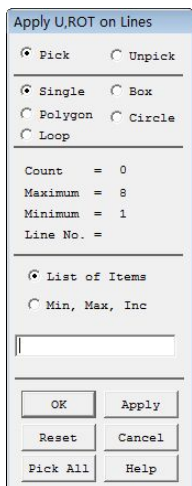


图 8.25 Apply U,ROT on Lines 拾取菜单

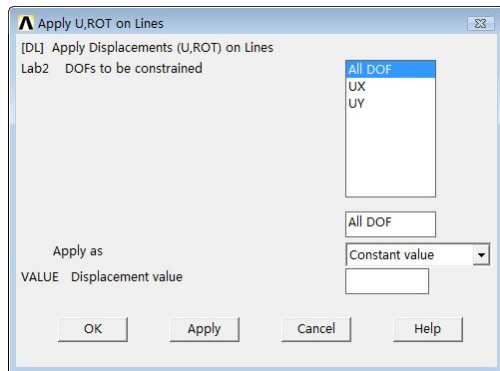


图 8.26 Apply U,ROT on Lines 对话框

step 2

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On lines 命令，弹出 Apply PRES on Lines 拾取菜单，如图 8.27 所示。用鼠标选择最右侧的线，单击 Apply 按钮，弹出 Apply PRES on lines 对话框，在 VALUEA Load PRES value 栏中输入 -1，如图 8.28 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。ANSYS 窗口显示的施加约束载荷后的结果如图 8.29 所示。

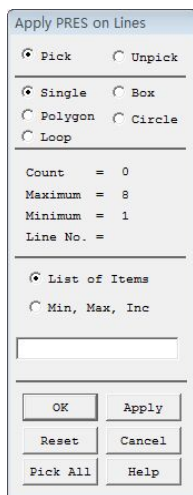


图 8.27 Apply PRES on Lines 拾取菜单

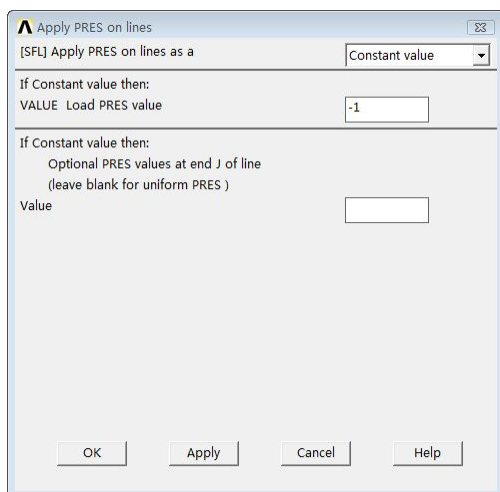


图 8.28 Apply PRES on lines 对话框

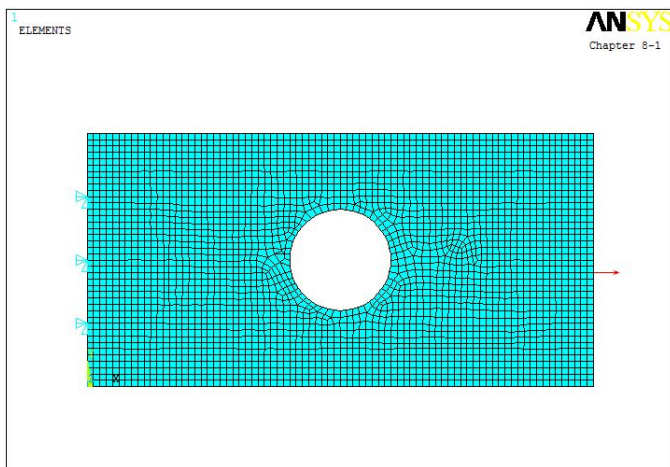


图 8.29 施加约束载荷后的结果



因为均布压力的指向为背离平板，所以压力值为负，表示边缘受拉。

step 3

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，如图 8.30 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 4

选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，如图 8.31 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

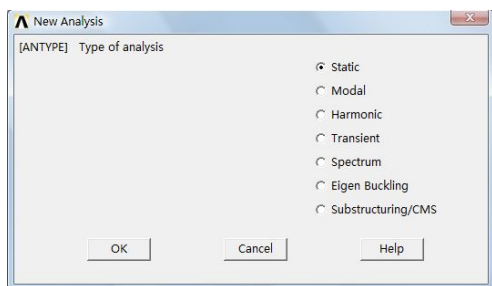


图 8.30 New Analysis 对话框

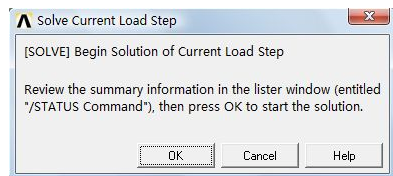


图 8.31 Solve Current Load Step 对话框

step 5

求解结束时，弹出 Note 对话框，如图 8.32 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

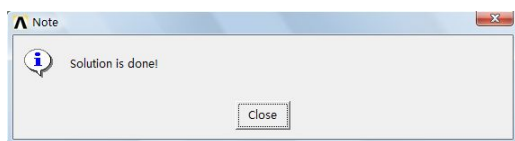


图 8.32 Note 对话框

step 6

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。至此，加载及求解过程结束，下面开始查看和分析结果。

8.3.2.6 查看求解结果

step 1

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undeformed 单选按钮，如图 8.33 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 8.34 所示。

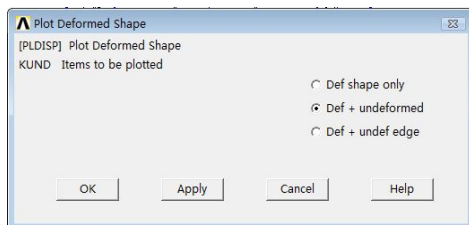


图 8.33 Plot Deformed Shape 对话框

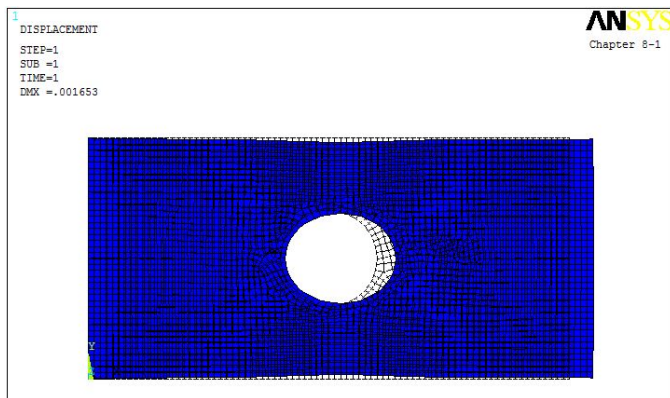


图 8.34 变形后的几何形状和未变形的几何形状

step 2 选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solu 命令，弹出 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All struc force F 选项，如图 8.35 所示，单击 OK 按钮，显示支座节点反作用力结果列表，如图 8.36 所示。

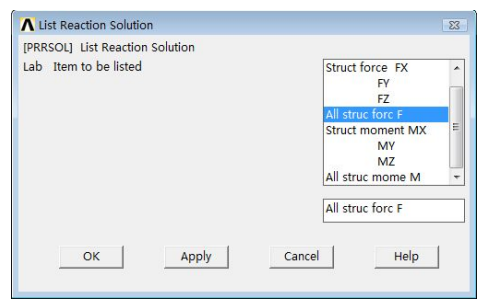


图 8.35 List Reaction Solution 对话框

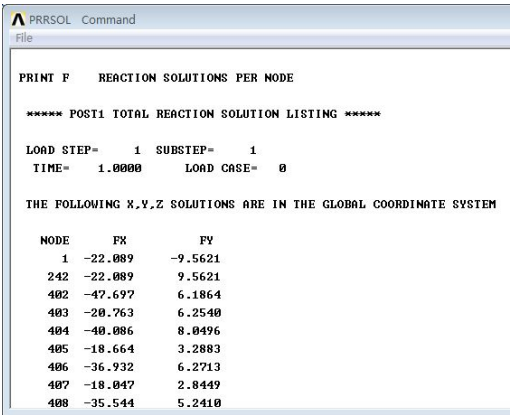


图 8.36 支座节点反作用力结果列表

step 3 选择 Main Menu→General Postproc→Plot results→Contour plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，然后选择对话框中 DOF Solution 选项下的 Displacement vector sum 选项，如图 8.37 所示，得出结构的总体位移云图，如图 8.38 所示。

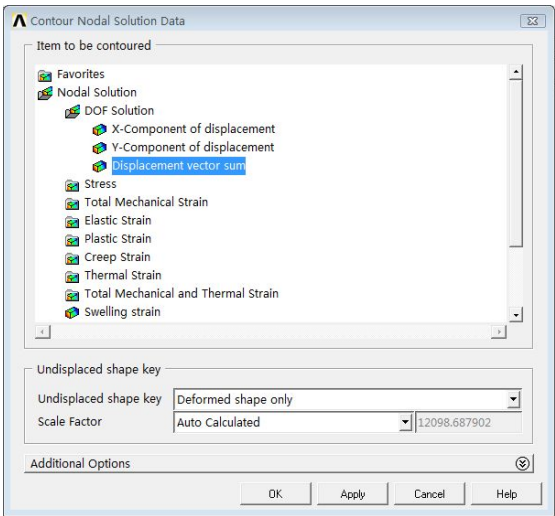


图 8.37 Contour Nodal Solution Data 对话框

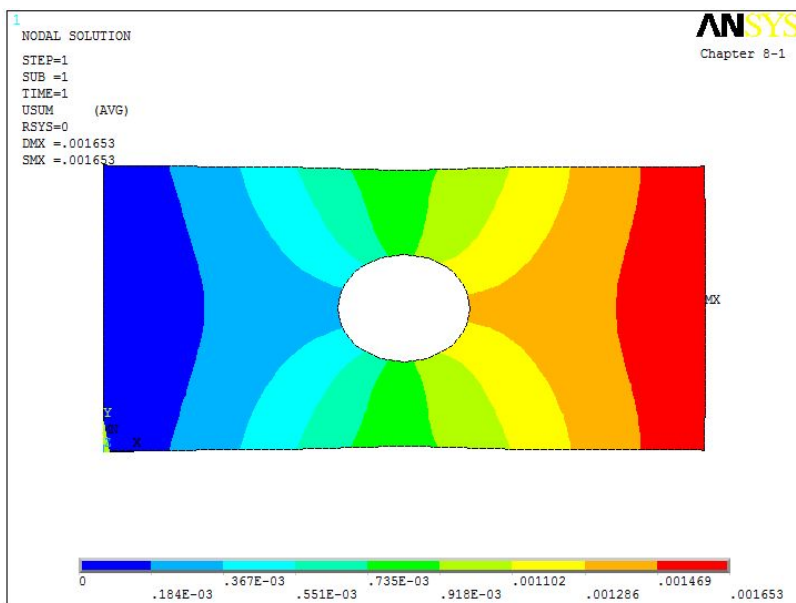


图 8.38 结构的总体位移云图

step 4

选择 Main Menu→General Postproc→Plot results→Contour plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Stress 下的 von Mises stress 选项，如图 8.39 所示，单击 OK 按钮，得到 Mises 等效应力云图，如图 8.40 所示。

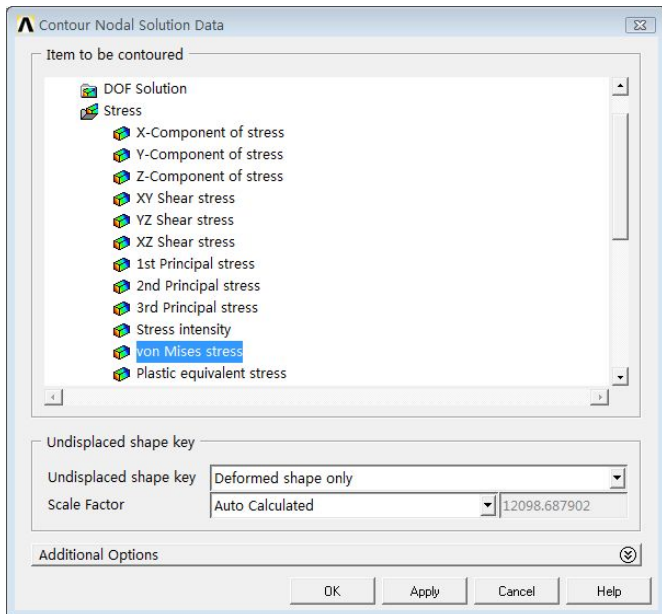


图 8.39 Contour Nodal Solution Data 对话框

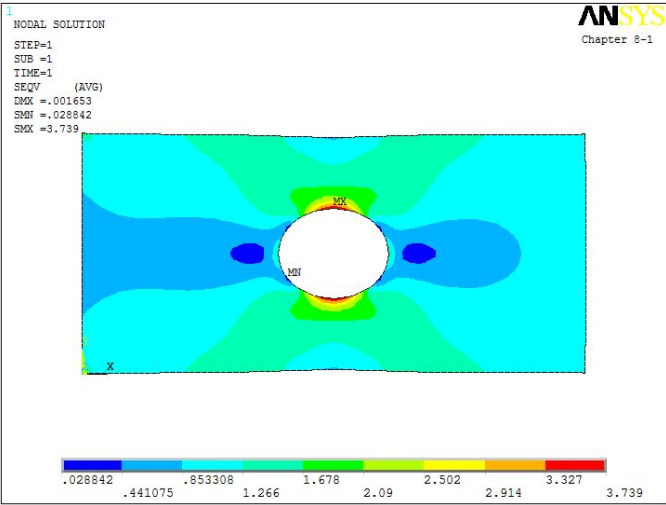


图 8.40 结构的 Mises 等效应力云图

step 5 列表显示 von Mises 等效应力，以查看特定节点的结果。选择 Main Menu→General Postproc→List results→Nodal Solution 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Stress 下的 von Mises stress 选项，单击 OK 按钮，得到 Mises 等效应力云图列表结果，如图 8.41 所示。

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQU
1	2.3016	0.40207	0.0000	2.3016	2.1292
2	1.0002	0.19848E-03	0.0000	1.0002	1.0001
4	1.3215	0.0000	-0.12565	1.4471	1.3886
6	1.1480	0.70323E-02	0.0000	1.1480	1.1445
8	1.0940	0.0000	-0.87112E-02	1.1028	1.0984
10	1.0648	0.0000	-0.19342E-03	1.0650	1.0649
12	1.0537	0.0000	-0.12228E-02	1.0550	1.0544
14	1.0524	0.0000	-0.53535E-03	1.0529	1.0527
16	1.0578	0.0000	-0.46473E-03	1.0582	1.0580
18	1.0681	0.0000	-0.34735E-03	1.0684	1.0682
20	1.0823	0.0000	-0.29116E-03	1.0826	1.0824
22	1.0998	0.0000	-0.24880E-03	1.1001	1.0999

图 8.41 节点应力列表结果

step 6 选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，如图 8.42 所示，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

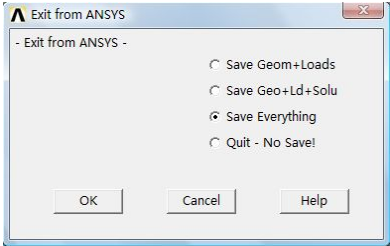


图 8.42 Exit from ANSYS 对话框

8.3.3 命令流

下面给出平板分析实例的命令流。

```

/PREP7                                ! 进入前处理器

ET,1,PLANE82                          ! 定义单元类型为 PLANE82 单元
KEYOPT,1,3,3                          ! 设置 PLANE82 单元选项

MP,EX,1,300000
MP,PRXY,1,0.31
R,1,10                                ! 定义板的厚度

BLC4,0,0,400,200                      ! 创建主矩形
CYL4,200,100,40                       ! 创建板中圆孔
ASBA,1,2                              ! 从板中挖出圆孔

AESIZE,ALL,5                          ! 定义网格尺寸
AMESH,ALL

FINI
/SOLU

ANTYPE,0                              ! 指定分析类型
DL,4,1,ALL,0                          ! 施加约束条件
SFL,2,PRES,-1                         ! 施加载荷
SOLVE

/POST1
PLDISP,1                              ! 显示变形前后的结构
PRRSOL,F                              ! 列表显示反力结果
PLNSOL,U,SUM,0,1                      ! 显示结构总体位移云图
PLNSOL,S,EQV,0,1                      ! 显示结构等效应力云图
FINISH

```

8.4 壳结构有限元分析实例详解 2：混凝土圆柱壳结构静力分析

本节介绍混凝土圆柱壳屋盖结构的 ANSYS 静力分析方法。

8.4.1 问题描述与分析

如图 8.43 所示，某混凝土圆柱面屋盖结构，厚度为 0.20m，拱的半径为 25m，长度为 39m，半圆心角为 30 度，侧向长边方向铰支，曲边竖向支撑，混凝土为 C40 混凝土，密度取 $2.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，弹性模量取 $3.25 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ，泊松比取 0.2，试分析其在自重作用下的内力以及变形情况。

该结构为柱壳结构，故采用高精度壳单元 SHELL93 来划分网格。

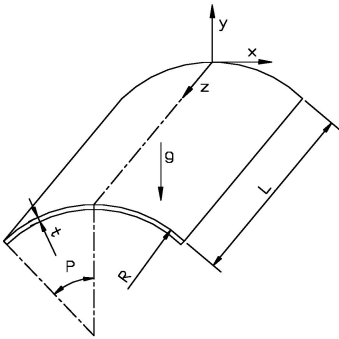


图 8.43 混凝土圆柱壳结构几何模型

8.4.2 求解过程

8.4.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，如图 8.44 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 8\8-2，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter8-2。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

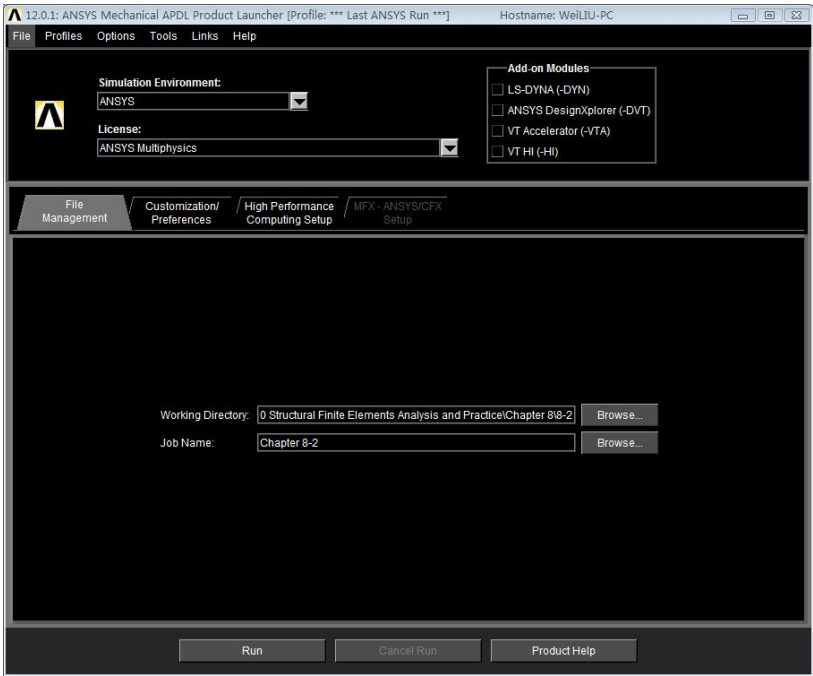


图 8.44 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口



可以先在目标文件位置建立工作目录，然后单击 Browse 按钮选择工作目录；也可以通过单击 Browse 按钮来选择工作文件名。

8.4.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 Main Menu→Preferences 命令,弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框,如图 8.45 所示,在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框,过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项,单击 OK 按钮关闭该对话框。

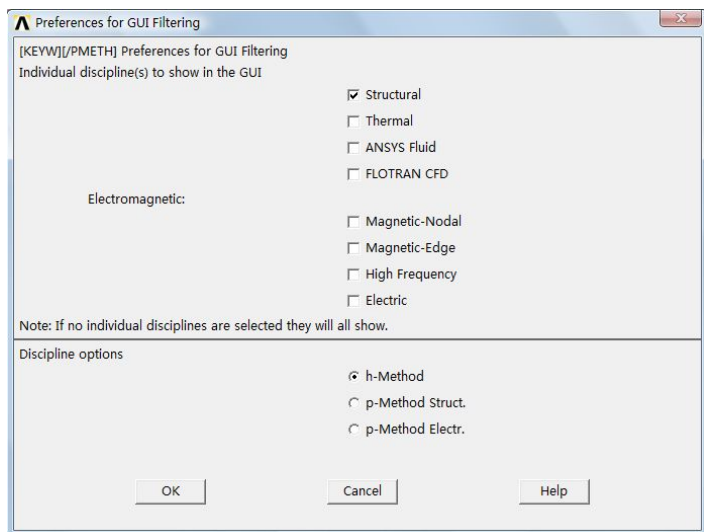


图 8.45 Preferences for GUI Filtering 对话框

step 2 选择 Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete 命令,弹出 Element Types 对话框,如图 8.46 所示,单击 Add 按钮,弹出 Library of Element Types 对话框,在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Shell 中的 Elastic 8node 93 单元,如图 8.47 所示,单击 OK 按钮关闭该对话框,单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

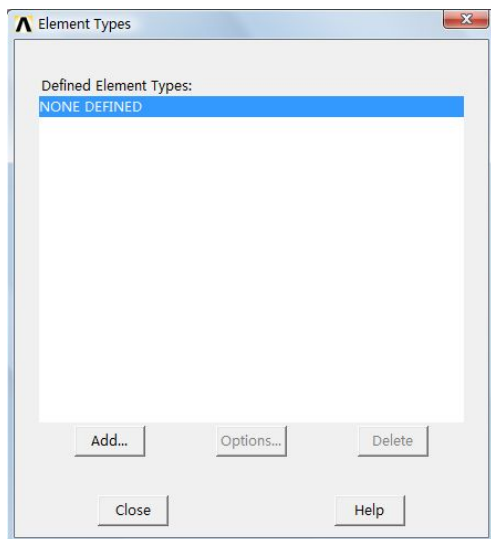


图 8.46 Element Types 对话框

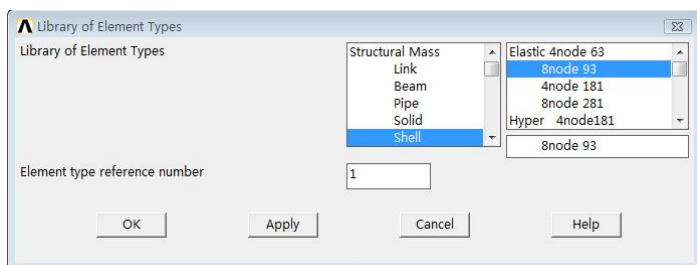


图 8.47 Library of Element Types 对话框

step 3

设置材料属性。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models** 命令，弹出 **Define Material Model Behavior** 对话框，在 **Material Models Available** 栏中依次展开 **Structural**→**Linear**→**Elastic**→**Isotropic** 选项，如图 8.48 所示，弹出 **Linear Isotropic Properties for Material Number 1** 对话框，在 **EX** 输入栏中输入 $3.25\text{e}10$ ，在 **PRXY** 输入栏中输入 0.2 ，如图 8.49 所示；再次在 **Material Models Available** 栏中依次展开 **Structural**→**Density** 选项，在打开的对话框中输入参数，如图 8.50 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。在 **Define Material Model**→**Behavior** 对话框中选择 **Material**→**Exit** 命令，关闭该对话框。

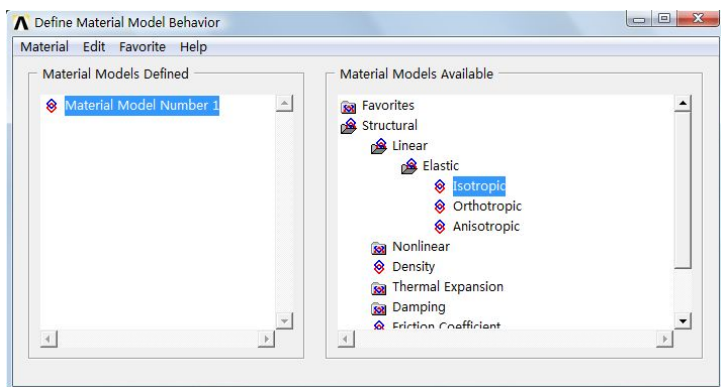


图 8.48 Define Material Model Behavior 对话框

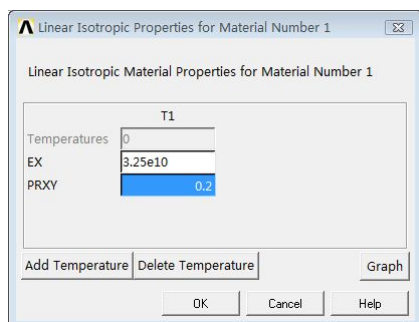


图 8.49 Linear Isotropic Properties for

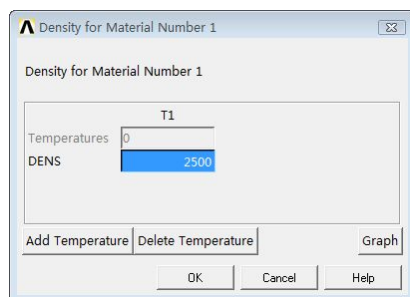


图 8.50 Density for Material Number 1 对

话框

Material Number 1 对话框



因为后面要考虑重力载荷作用，本实例与前面章节的实例不同，在这里需要输入密度。

step 4

设置实常数。选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Real Constants 对话框，如图 8.51 所示，单击 Add 按钮，单击 OK 按钮，弹出 Real Constant Set Number 1, for SHELL93 对话框，在 Shell thickness at node I TK(I) 输入栏中输入 0.2，如图 8.52 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Real Constants 对话框。

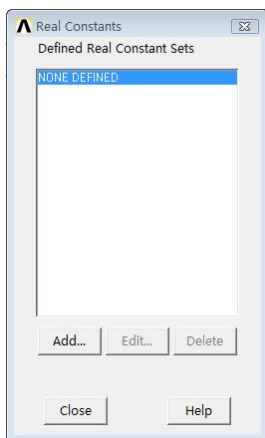


图 8.51 Real Constants 对话框

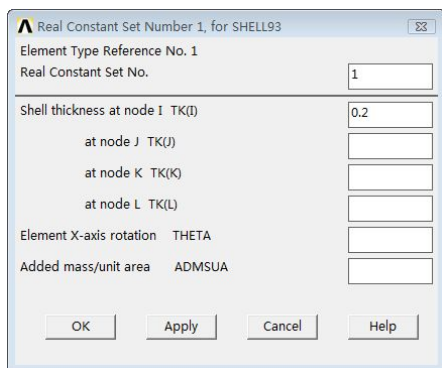


图 8.52 Real Constant Set Number 1, for SHELL93 对话框




如果整个圆柱壳都是同一厚度，则 SHELL93 单元厚度不变，只需输入 Shell thickness at node I TK(I) 即可，即只需输入 I 节点的单元厚度，程序默认单元其他节点的厚度与其一样，厚度均匀变化；如果厚度是变化的，则需单独输入每个节点的厚度。

step 5

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。



也可单击  按钮或 SAVE_DB 按钮来实现保存操作。

8.4.2.3 创建几何模型

step 1

将总体柱坐标系设为活动坐标系。选择 Utility Menu→WorkPLANE→Change active cs to→Global Cylindrical 命令即可。



该实例的几何模型为圆柱形，在柱坐标系下建模更方便，更改总体柱坐标系为活动坐标系后，原来的直角坐标系下的 x 、 y 、 z 坐标变为柱坐标系下的 r 、 θ 、 z 坐标。

step 2

建立关键点。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In active cs 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 25、60、0，如图 8.53 所示，单击 Apply 按钮建立关键点 1；然后在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中



输入 25、120、0，单击 **Apply** 按钮建立关键点 2；接着在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 25、60、39，单击 **Apply** 按钮建立关键点 3；最后在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 25、120、39，单击 **OK** 按钮建立关键点 4。建立完 4 个关键点后的结果如图 8.54 所示。

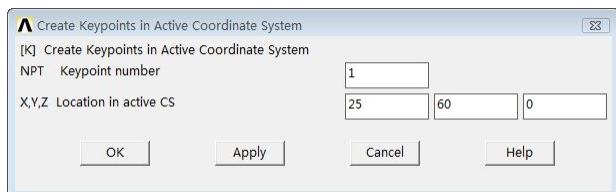


图 8.53 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

step 3

创建圆柱面。执行 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Area**→**Arbitrary**→**Through KPS** 命令，弹出 **Create Area Thru KPs** 拾取菜单，如图 8.55 所示，在图形界面窗口中用鼠标依次选择关键点 1、2、4、3，单击 **OK** 按钮，生成圆柱面。

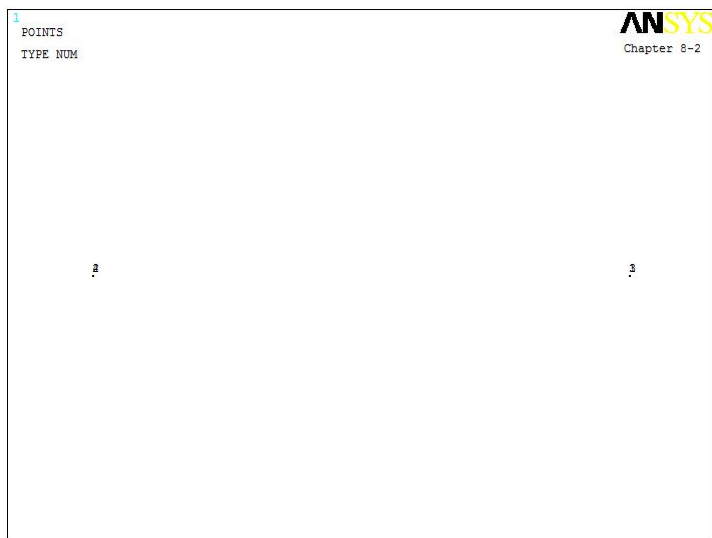


图 8.54 建立完 4 个关键点后的结果

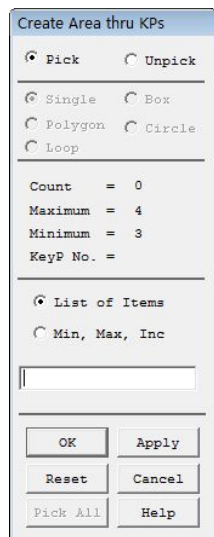


图 8.55 Create Area thru KPs 拾取菜单





当前坐标系为总体柱坐标系，因此通过关键点形成的面，其各边默认与当前坐标系的坐标方向一致。

step 4

选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Pan Zoom Rotate ...**命令，弹出 **Pan-Zoom-Rotate** 对话框，如图 8.56 所示，在该对话框中选择视图方向为 **Obliq**，则 ANSYS 图形窗口的显示结果如图 8.57 所示。



该操作也可以单击 **Utility Menu** 菜单下的  按钮来实现，还可以单击 ANSYS 图形窗口右侧的  按钮来直接实现。

step 5

至此，我们已经完成了圆柱面几何模型的建立，选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as**

Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

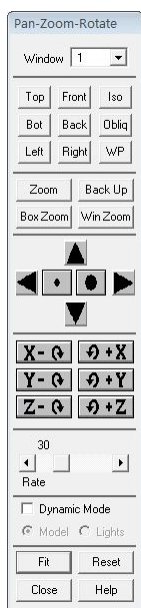


图 8.56 Pan-Zoom-Rotate 对话框

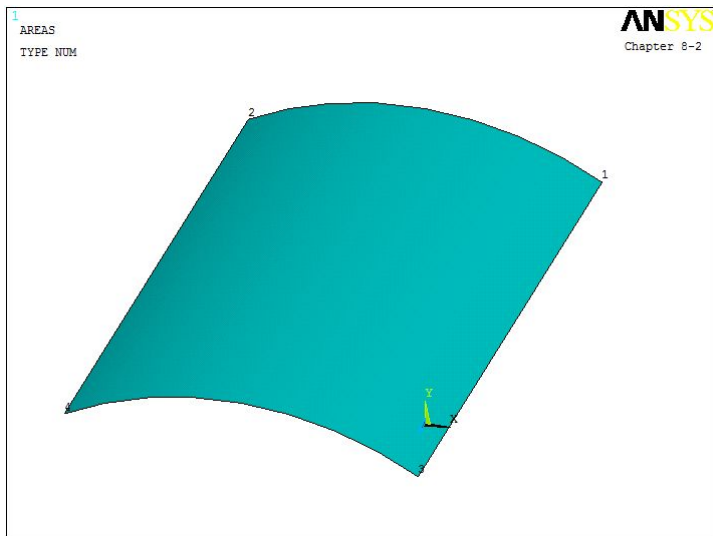


图 8.57 生成的圆柱面结果（总体柱坐标系）

8.4.2.4 划分网格

step 1

选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manual Size→Areas→All Areas 命令，弹出 Element Sizes on All Selected Areas 对话框，如图 8.58 所示。指定网格边长为 2m，至于 2m 是否合适，可以根据划分单元的大小或计算结果是否收敛来继续调整。

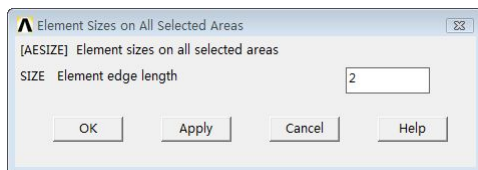


图 8.58 Element Sizes on All Selected Areas 对话框

step 2

划分网格。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided 命令，弹出 Mesh Areas 拾取菜单，如图 8.59 所示，选择需要划分网格的圆柱面，单击 OK 按钮，对其进行网格划分，结果如图 8.60 所示。

step 3

至此，我们已经完成了圆柱面壳结构的网格划分工作，选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

8.4.2.5 加载求解

step 1

将当前坐标系变为总体直角坐标系。选择 Utility Menu→Work PLANE→Change Active CS to→Global Cartesian 命令即可。

step 2

对圆柱面壳的纵向长边施加较支约束，即约束所有的线位移自由度。选择 Utility Menu→Select→Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，在该对话框中分别选择 Nodes, By Location, X coordinates 选项，在 Min, Max 输入栏中输入 12.5（选择右边纵向长边），

选择 **From Full** 单选按钮，如图 8.61 所示，单击 **Apply** 按钮。然后再在 **Min, Max** 输入栏中输入 -12.5（选择左边纵向长边），选择 **Also Select** 单选按钮，单击 **OK** 按钮退出该对话框。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Displacement**→**On Nodes** 命令，弹出 **Apply U,ROT on Nodes** 拾取菜单，如图 8.62 所示，单击 **Pick All** 按钮，弹出 **Apply U,ROT on Nodes** 对话框，在 **Lab2 DOFs to be constrained** 列表框中选择 **UX, UY, UZ** 选项，如图 8.63 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

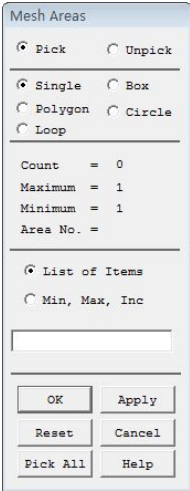


图 8.59 Mesh Areas 拾取菜单

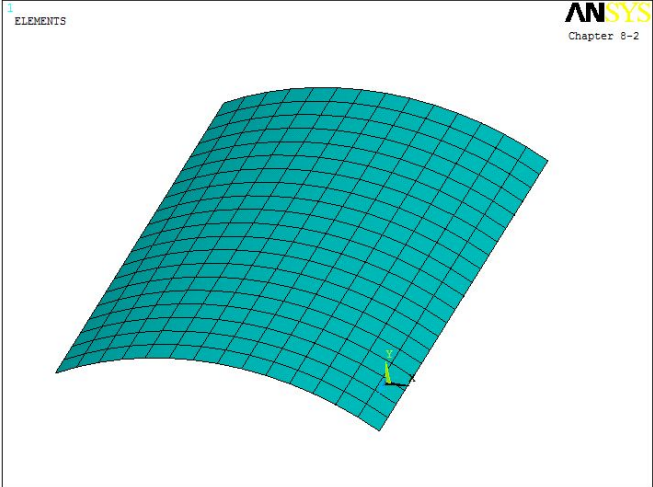


图 8.60 划分网格后的结果



图 8.61 Select Entities 对话框

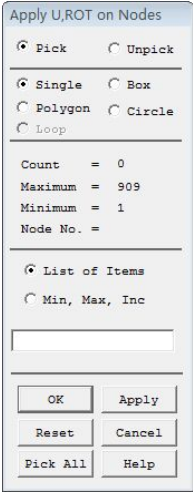


图 8.62 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单

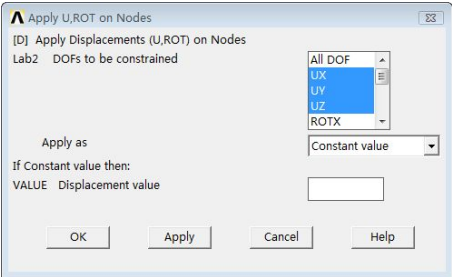


图 8.63 Apply U,ROT on Nodes 对话框

step 3

对圆柱面壳的曲边施加竖向约束，即约束所有的 **UY** 线位移自由度。选择 **Utility Menu**→**Select**→**Entities** 命令，弹出 **Select Entities** 对话框，分别选择 **Nodes**, **By Location**, **Z coordinates** 选项，在 **Min, Max** 输入栏中输入 0（选择后面曲边），选择 **From Full** 单选按钮，如图 8.64 a) 所示，单击 **Apply** 按钮。再在 **Min, Max** 输入栏中输入 39（选择前面曲边），选择 **Also Select** 单选按钮，如图 8.64 b) 所示，单击 **Apply** 按钮。然后再选择 **X coordinates** 单选按钮，在 **Min, Max** 输入栏中输入 12.5（不选择已经施加约束的纵向长边 $x=12.5$ 上的点），选择 **Unselect** 单选按钮，如图 8.64 c) 所示，单击 **Apply** 按钮。再在 **Min, Max** 输入栏中输入 -12.5（不选择已经施加约束的纵向长边 $x=-12.5$ 上的点），如图 8.64 d) 所示，单击 **OK** 按钮退出该对话框。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Displacement**→**On Nodes** 命令，弹出 **Apply U,ROT on Nodes** 拾取菜单，单击 **Pick All** 按钮，弹出 **Apply U,ROT on Nodes** 对话框，在 **Lab2 DOFs to be constrained** 列表框中选择 **UY** 选项，如图 8.65 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。选择 **Utility Menu**→**Select**→**Everything** 命令，恢复选择整个有限元模型的全部对象。

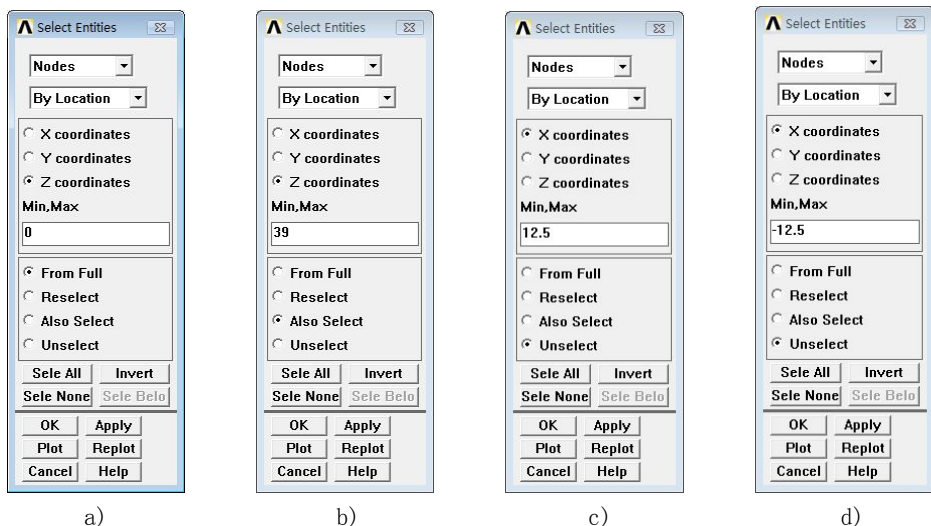


图 8.64 Select Entities 对话框

step 4

施加重力。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Inertia**→**Gravity**→**Global** 命令，弹出 **Apply (Gravitational) Acceleration** 对话框，输入重力在 **Y** 方向上的加速度 9.8，如图 8.66 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。此时，ANSYS 窗口显示的施加约束和重力后的结果如图 8.67 所示。

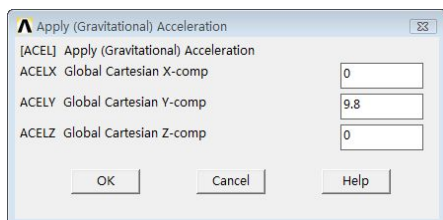
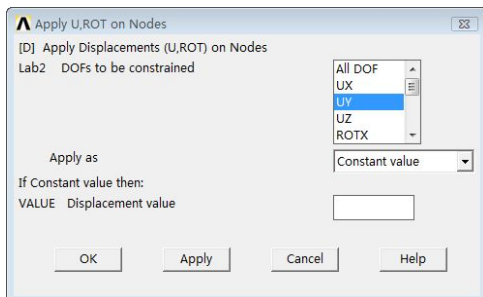


图 8.65 Apply U,ROT on Nodes 对话框

图 8.66 Apply (Gravitational) Acceleration 对话框

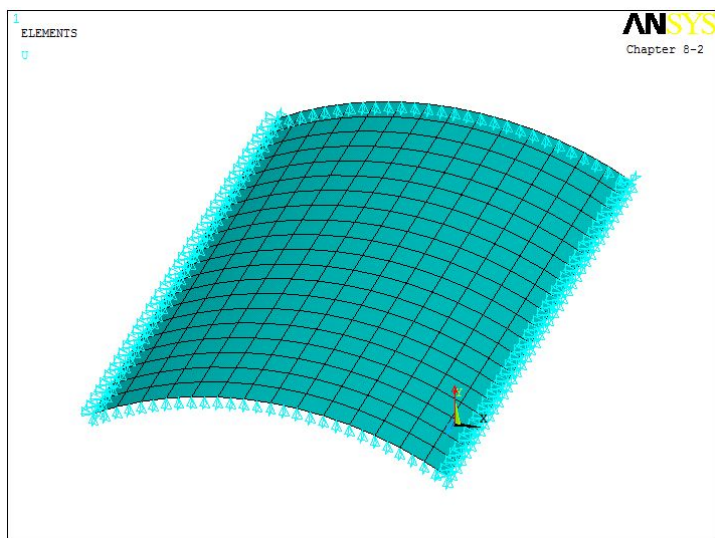


图 8.67 施加约束和重力后的结果



ANSYS 将重力视为惯性力，通过施加加速度的形式来施加。根据惯性力的特性，其方向总是与加速度方向相反，因此该实例中重力是沿着 Y 轴的负方向，重力加速度的正方向应与重力相反，为 Y 轴正方向，因此输入正值。

step 5

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，如图 8.68 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

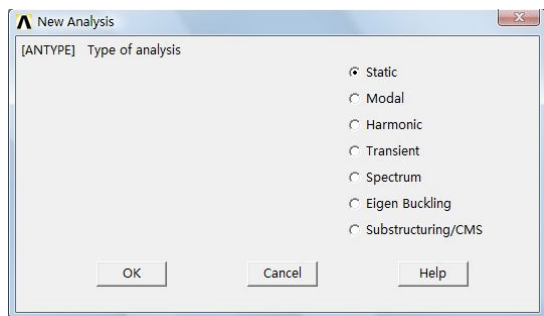


图 8.68 New Analysis 对话框

step 6

选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，如图 8.69 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

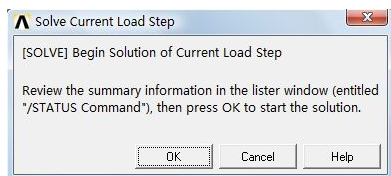


图 8.69 Solve Current Load Step 对话框

step 7 求解结束时，弹出 Note 对话框，如图 8.70 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

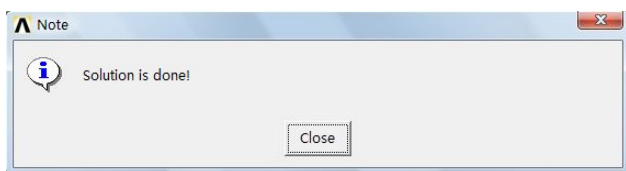


图 8.70 Note 对话框

step 8 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。至此，加载及求解过程结束，下面开始查看和分析结果。

8.4.2.6 查看求解结果

step 1 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undeformed 单选按钮，如图 8.71 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 8.72 所示。

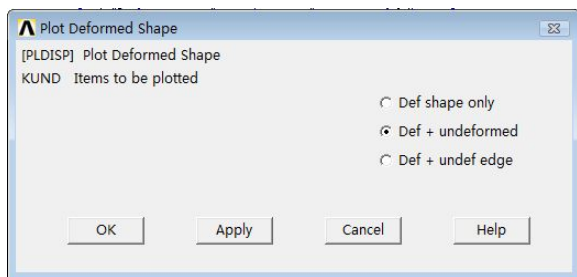


图 8.71 Plot Deformed Shape 对话框

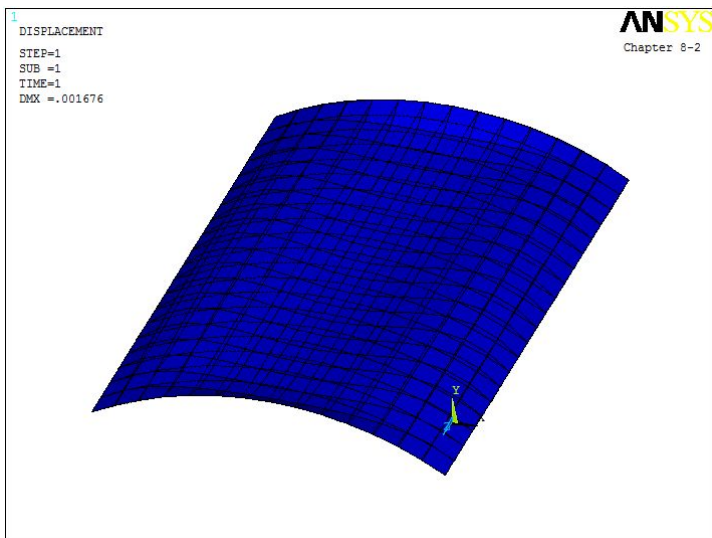


图 8.72 变形后的几何形状和未变形的几何形状

step 2 选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solu 命令，弹出 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All struc force F 选项，

如图 8.73 所示，单击 OK 按钮，显示支座节点反作用力结果列表，如图 8.74 所示。

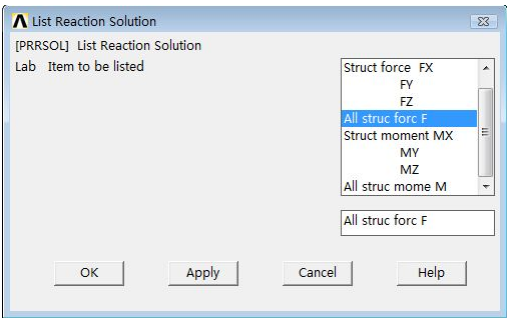


图 8.73 List Reaction Solution 对话框

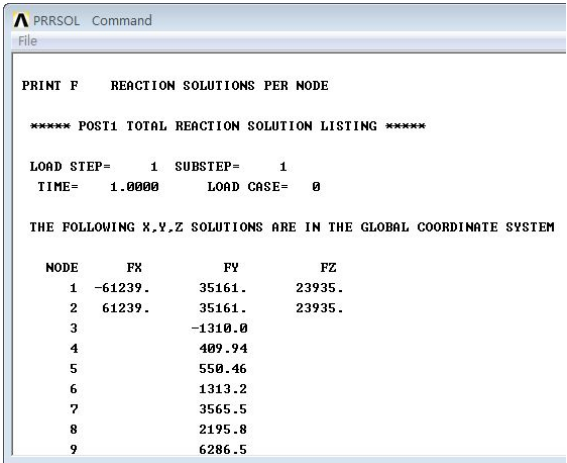


图 8.74 支座节点反作用力结果列表

step 3 选择 Main Menu→General postproc→Plot results→Contour plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 DOF solution 选项下的 Displacement vector sum 选项，单击 OK 按钮，如图 8.75 所示，得出结构的总体位移云图，如图 8.76 所示。

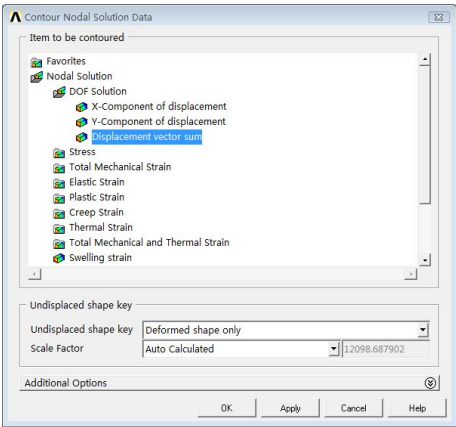


图 8.75 Contour Nodal Solution Data 对话框

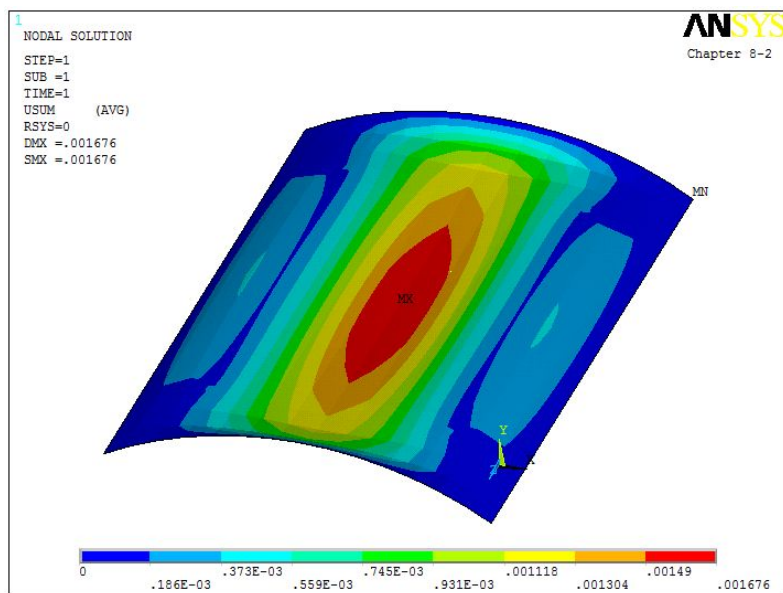


图 8.76 结构的总体位移云图

step 4

选择 Main Menu→General Postproc→Plot results→Contour plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Stress 下的 von Mises stress 选项，如图 8.77 所示，单击 OK 按钮，得到 Mises 等效应力云图，如图 8.78 所示。

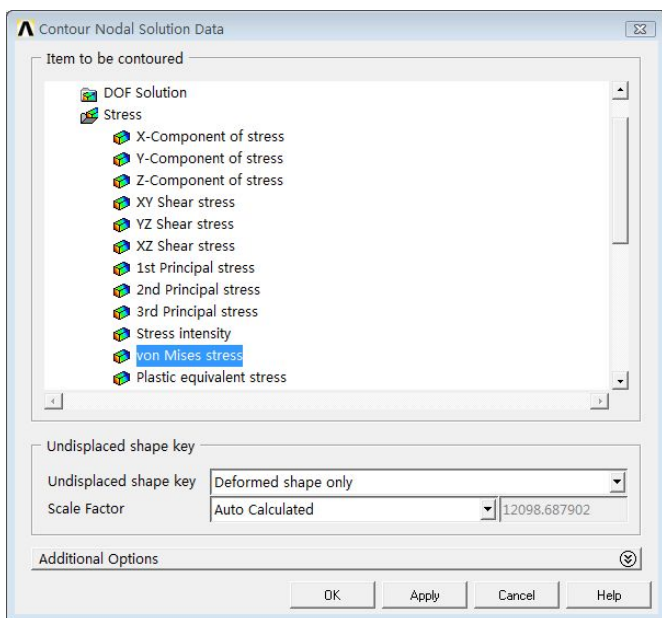


图 8.77 Contour Nodal Solution Data 对话框

step 5

选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，如图 8.79 所示，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

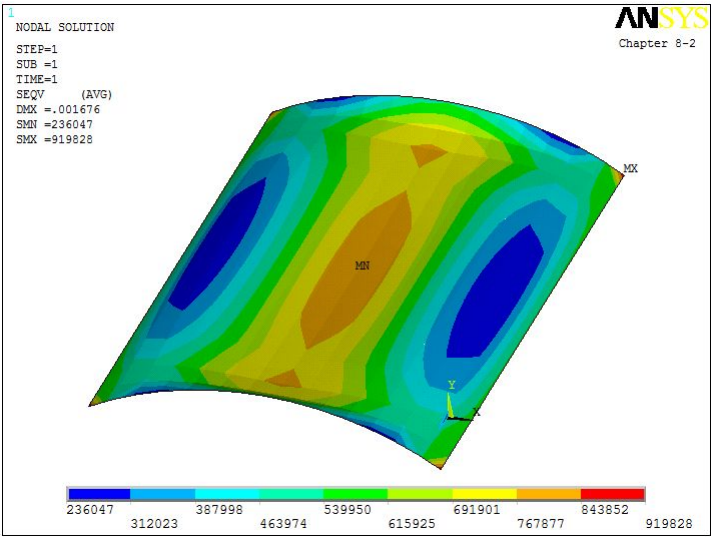


图 8.78 结构的 Mises 等效应力云图

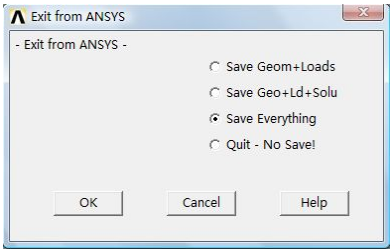


图 8.79 Exit from ANSYS 对话框

8.4.3 命令流

下面给出混凝土圆柱壳结构静力分析的命令流。

/PREP7	！ 进入前处理器
ET,1, SHELL93	！ 定义单元类型为 SHELL93 单元
MP,EX,1,3.25e10	！ 定义材料属性
MP,PRXY,1,0.2	
MP,dens,1,2500	
R,1,0.2	！ 定义实常数
Csys,1	！ 将柱坐标系设为当前坐标系
K, 1,25,60,0	！ 建立关键点
K, 2,25,120,0	
K, 3,25,60,39	
K, 4,25,120,39	
A,1,2,4,3	！ 创建曲面
AESIZE,ALL,2	！ 定义网格尺寸
MSHKEY,1	！ 设置映射网格

```

AMESH,ALL
FINI

/SOLU
ANTYPE,0           ! 指定分析类型

CSYS,0

Nsel,s,loc,x,12.5,           ! 选择纵向长边受约束节点
Nsel,a,loc,x,-12.5,

D,all,ux           ! 约束三向线位移
D,all,uy
D,all,uz

Nsel,s,loc,z,0,           ! 选择曲边受约束节点
Nsel,a,loc,z,39,
Nsel,u,loc,x,12.5,
Nsel,u,loc,x,-12.5,
D,all,uy           ! 约束竖向位移

Allsel,all           ! 恢复选择全部对象
Acel,0,9.8,0           ! 对整个模型施加重力

SOLVE           ! 求解
FINI

/POST1
PLDISP,1           ! 显示变形前后的结构
PLNSOL,U,SUM,0,1           ! 显示结构总体位移云图
PLNSOL,S,EQV,0,1           ! 显示结构等效应力云图
FINISH

```

8.5 小结

本章介绍了板壳结构有限元分析的基本方法，并通过两个工程实例介绍了用 ANSYS 进行分析的具体操作方法，同时介绍了自顶向下建模中广泛采用的布尔操作命令。



第 9 章 ANSYS 实体结构有限元分析

本章包括

- ◆ 实体结构有限元分析基本过程
- ◆ ANSYS 中提供的实体单元简介
- ◆ 实例详解 1：立体钢架的静力分析
- ◆ 实例详解 2：轴承座的静力分析

实际的结构构件都是三维实体，只不过在一定条件下，可将其简化为一维的杆件、二维的板壳、平面问题或轴对称问题来进行分析。对各种三维的机械零件及一些建筑构件或细部构造进行力学分析时，都需要建立三维的有限元模型。

本章主要介绍在 ANSYS 中进行三维实体结构有限元分析的基本方法，同时结合工程实例进行详解。

9.1 实体结构有限元分析基本过程

实体结构有限元分析属于弹性力学空间问题，常见于各类机械零部件的力学分析（见图 9.1）、建筑结构的节点分析（见图 9.2）等。其分析过程和分析方法与平面问题完全类似，也要经过以下 3 个基本步骤：网格划分，单元分析，整体分析。

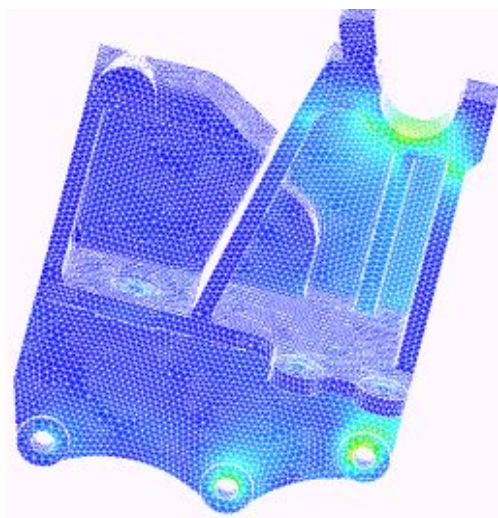


图 9.1 汽车支架结构

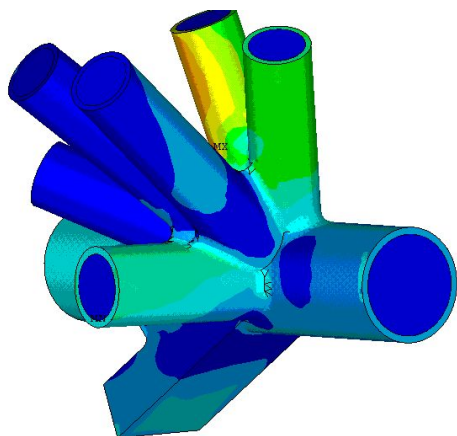


图 9.2 管桁架节点

9.1.1 网格划分

有限元法的基础是用有限个单元体的集合来代替原有的连续体。因此,首先要对实体结构进行必要的简化,再将实体结构划分为有限个单元组成的离散体。单元之间通过单元节点相连接。通常把三维实体划分成四面体或六面体单元的网格,如图 9.3、图 9.4 和图 9.5 所示。

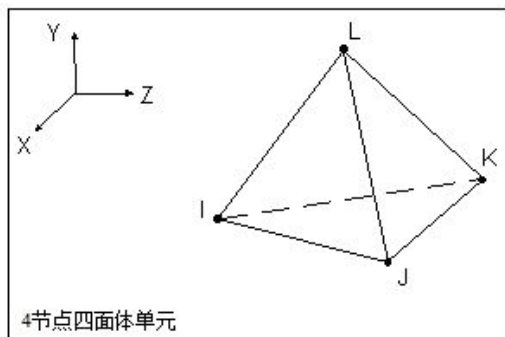


图 9.3 四面体 4 节点单元

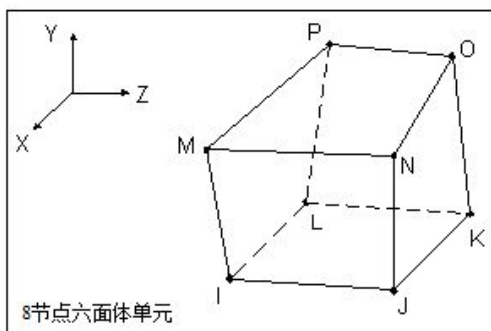


图 9.4 六面体 8 节点单元

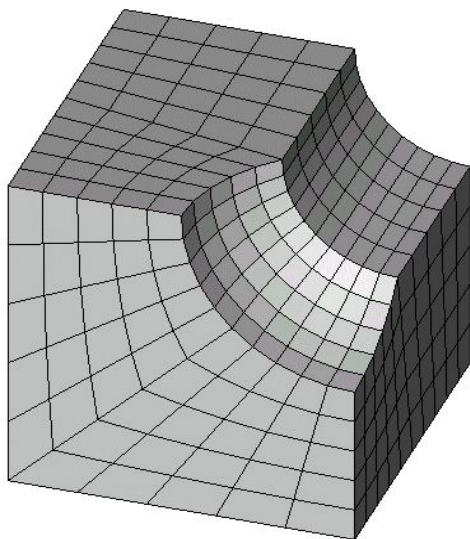


图 9.5 实体结构的六面体单元划分

9.1.2 单元分析

对于弹性力学问题而言,单元分析就是建立各个单元的节点位移和节点力之间的关系式。由于将单元的节点位移作为基本变量,所以进行单元分析时首先要为单元内部的位移确定一个近似表达式,然后计算单元的应变、应力,再建立单元中节点力与节点位移的关系式。对于弹性力学空间问题而言,有 3 个位移分量、6 个应力(或应变)分量,但其分析过程和分析方法与平面问题完全类似,本节不做重点阐述,感兴趣的读者可参看第 8 章内容或其他有限元书籍。

9.1.3 整体分析

与弹性力学平面问题的整体分析一样,实体结构有限元分析也是对由各个单元组成的整体进行分析,建立节点外载荷与结点位移的关系,以解出结点位移。

9.2 ANSYS 中提供的实体单元简介

ANSYS 程序中提供了多种实体单元,典型的有普通 8 节点六面体结构实体单元 **SOLID45**、用在含钢筋或不含钢筋的三维实体模型中的单元 **SOLID65**、具有二次位移差值且能划分不规则网格的 10 节点四面体结构实体单元 **SOLID92**、高阶三维 20 节点实体结构单元 **SOLID186**、高阶三维 10 节点实体结构单元 **SOLID187** 等。本节重点介绍 **SOLID45**、**SOLID65** 和 **SOLID92** 单元。

9.2.1 SOLID45 单元特性简介

SOLID45 单元用于建立三维实体结构模型,单元通过 8 个节点来定义,每个节点有 3 个分别沿着 x 、 y 、 z 方向平移的自由度。此单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形和大应变等功能。**SOLID45** 单元的输入参数、结果输出定义、结果输出项及序列号请参见 ANSYS 帮助文件中的单元手册。**SOLID45** 单元的几何模型如图 9.6 所示。

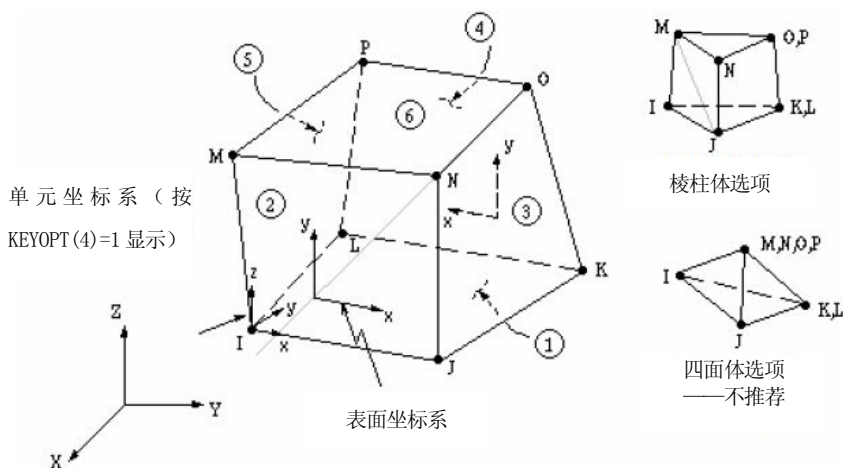


图 9.6 SOLID45 单元的几何模型

SOLID45 单元在具体应用时有以下几点需要注意。

- ◆ 不能存在体积为零的单元。
- ◆ 单元节点编号可参照图 9.6 所示的 **SOLID45** 单元的几何模型图,面 $IJKL$ 和面 $MNOP$ 可互换。
- ◆ 单元不能扭曲,否则会导致生成两个独立的体,这通常发生在单元节点编号不当时。
- ◆ 所有单元都必须有 8 个节点,对于棱柱体单元,可通过定义重合的 K 和 L 节点、 O 和 P 节点来形成;而对于四面体单元,可通过定义重合的 M 、 N 、 O 和 P 节点及 K 和 L 节点来形成,此时,额外形状被自动删除。通常,四面体形状不推荐使用。

9.2.2 SOLID65 单元特性简介

SOLID65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。该实体模型可具有拉裂与压碎的性能。在混凝土的应用方面,可以用单元的实体性能来模拟混凝土,用加筋性能来模拟钢筋的作用。当然该单元也可用于其他方面,如加筋复合材料(如玻璃纤维)及地质材料(如岩石)等。该单

元具有 8 个节点，每个节点有 3 个自由度，即 x , y , z 3 个方向的线位移，还可对 3 个方向的含筋情况进行定义。

SOLID65 单元与 **SOLID45** 单元相似，只是增加了描述开裂与压碎的性能。该单元最重要的方面在于其对材料的非线性处理。其可模拟混凝土的开裂（3 个正交方向）、压碎、塑性变形及徐变，还可模拟钢筋的拉伸、压缩、塑性变形及蠕变，但不能模拟钢筋的剪切性能。有关 **SOLID65** 单元的输入参数、结果输出定义、结果输出项及序列号请参见 **ANSYS** 帮助文件中的单元手册。**SOLID65** 单元的几何模型如图 9.7 所示。

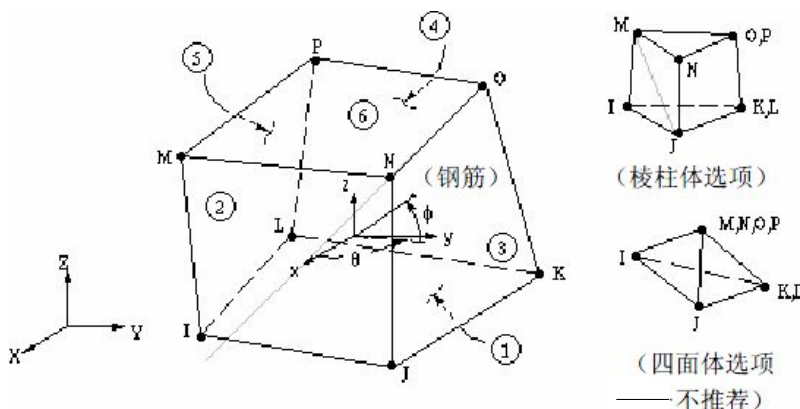


图 9.7 SOLID65 单元的几何模型

SOLID65 单元在具体应用时有以下几点需要注意。

- ◆ 单元是非线性的，必须要求迭代解。
- ◆ 混凝土材料是初始各向同性的，带筋单元中的钢筋假设为分布型。
- ◆ 裂缝可以在积分点的 3 个正交方向产生，当裂缝发生时，把裂缝处理为分布型而不是分离型。
- ◆ 在单元发生塑性变形时，通常应用 **D-P** 破坏面，塑性性质发生在开裂和压碎前。
- ◆ 如果同时使用拉裂和压碎，则必须缓慢加载以避免混凝土在正确的载荷通过闭合裂缝传递前出现可能的虚假压碎。由于泊松效应，过多的裂缝应变与正交的未裂缝方向耦合起来即会发生这种情况。在那些已经压碎的积分点，输出的塑性和蠕变应变来自前一个收敛的子步。
- ◆ 当混凝土开裂时，弹性应变的输出包括开裂应变。开裂或压碎单元丧失的剪力抵抗能力不能传递给没有抗剪能力的钢筋。
- ◆ 当使用开裂或压碎非线性特性时，不推荐使用应力强化效应及大变形和大应变等操作，尤其在大转动比较明显时，结果将不会收敛或不正确。

9.2.3 SOLID92 单元特性简介

SOLID92 单元具有二次位移型函数，非常适合于模拟不规则形状的结构（例如由各种 **CAD/CAM** 系统产生的网格模型）。**SOLID92** 单元由 10 个节点定义，每个节点有 3 个自由度：节点坐标系的 x , y , z 方向的平动。此单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形和大应变等功能。有关 **SOLID92** 单元的输入参数、结果输出定义、结果输出项及序列号请参见 **ANSYS** 帮助文件中的单元手册。

SOLID92 单元的几何模型如图 9.8 所示。

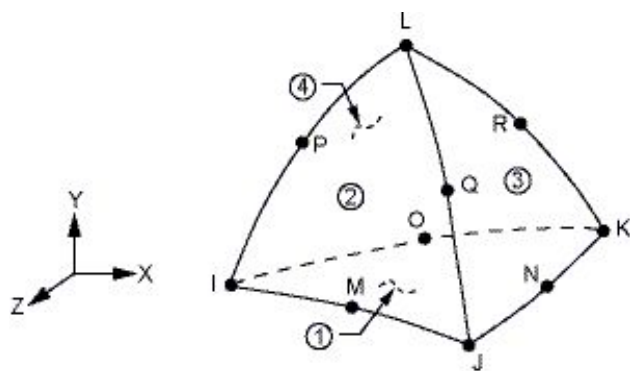


图 9.8 SOLID92 单元的几何模型

SOLID92 单元在具体应用时有以下几点需要注意。

- ◆ SOLID92 单元的体积不能为零。单元的编号规则可参见图 9.8 所示的 SOLID92 单元的几何模型。
- ◆ 如果有一个被去除中点的边缘，则表示位移沿那个边缘线性地变化，而不是抛物线式地变化。

9.3 实体结构有限元分析实例详解 1：立体钢架的静力分析

9.3.1 问题描述与分析

如图 9.9 所示的立体钢架结构，其顶面承受 1000N/m^2 的均布载荷，钢架通过两个孔的内表面固定在墙上，钢架材料的弹性模量为 $2.1\times10^{11}\text{N/m}^2$ ，泊松比为 0.3。试计算钢架的变形及 von Mises 应力分布，并观察其在图中的位置。

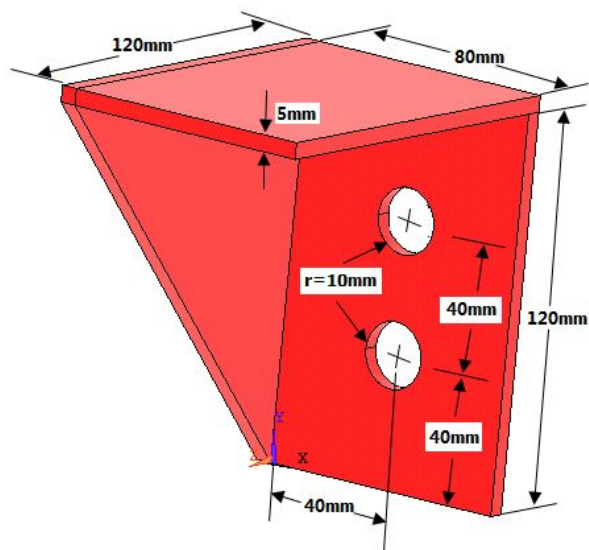


图 9.9 立体钢架结构示意图

采用自顶向下和自底向上相结合的建模方法建立该实例的三维模型，选择 **SOLID92** 单元划分网格，单元长度控制为 **5mm**。

9.3.2 求解过程

9.3.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 **ANSYS Mechanical APDL Product Launcher** 窗口，如图 9.10 所示。在 **License** 下拉列表框中选择 **ANSYS Multiphysics**，在 **Working Directory** 输入栏中输入工作目录：**C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 9\9-1**，在 **Job Name** 输入栏中输入工作文件名：**Chapter9-1**。以上参数设置完毕后，单击 **Run** 按钮运行 **ANSYS** 程序。

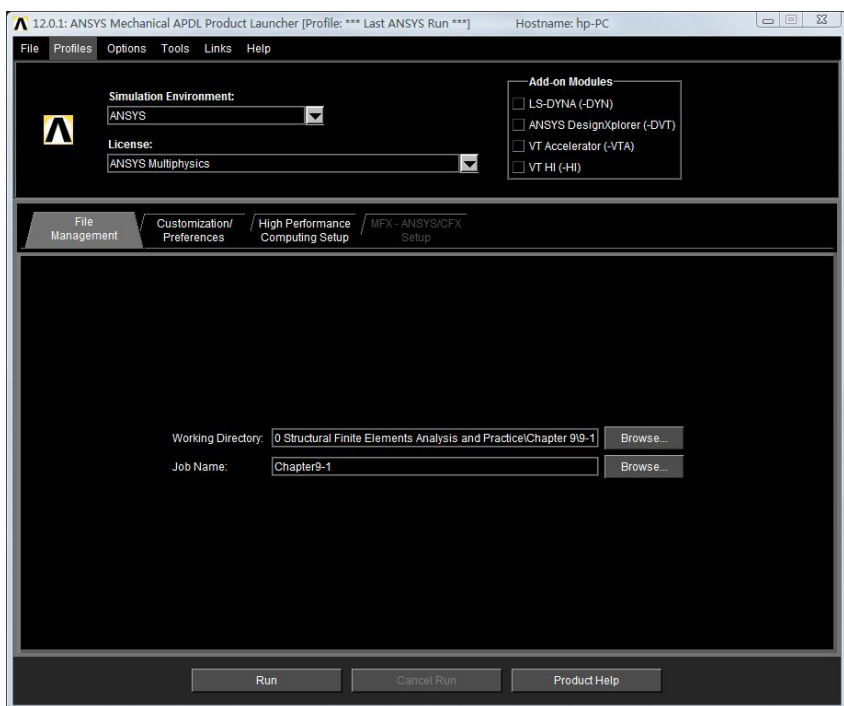


图 9.10 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口



可以先在目标文件位置建立工作目录，然后单击 **Browse** 按钮选择工作目录；也可以通过单击 **Browse** 按钮来选择工作文件名。

9.3.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 **Main Menu**→**Preferences** 命令，弹出 **Preferences for GUI Filtering** 对话框，如图 9.11 所示，在 **Individual discipline(s) to show in the GUI** 栏中选中 **Structural** 复选框，过滤掉 **ANSYS GUI** 菜单中与结构分析无关的选项，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete** 命令，弹出 **Element Types** 对话框，如图 9.12 所示，单击 **Add** 按钮，弹出 **Library of Element Types** 对话框，

在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid 中的 Tet 10node 92 单元, 如图 9.13 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框, 单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

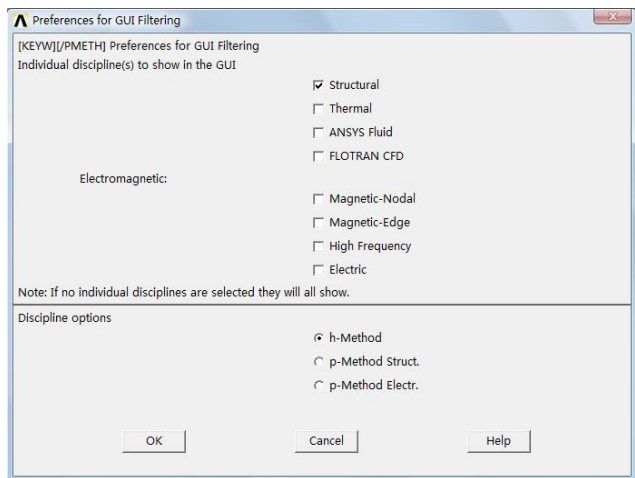


图 9.11 Preferences for GUI Filtering 对话框

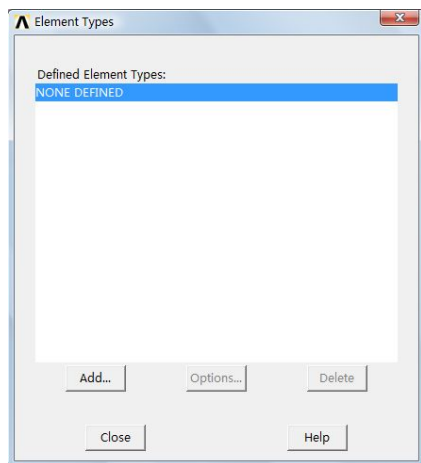


图 9.12 Element Types 对话框

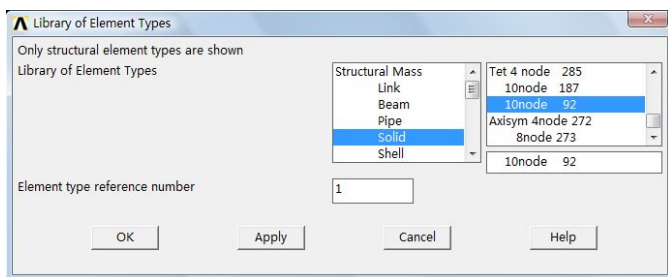


图 9.13 Library of Element Types 对话框

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令, 弹出 Define Material Model Behavior 对话框, 在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项, 如图 9.14 所示, 弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框, 在 EX 输入栏中输入 $2.1e11$, 在 PRXY 输入栏中输入 0.3, 如图 9.15 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令, 关闭该对话框。

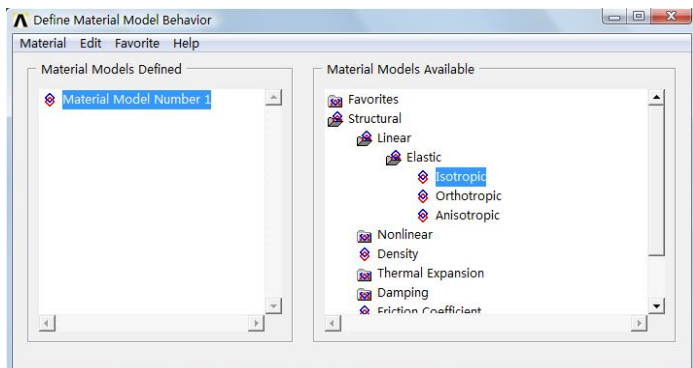


图 9.14 Define Material Model Behavior 对话框

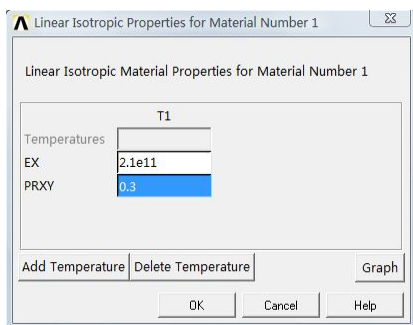


图 9.15 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 4

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。



此操作为保存，也可通过单击 按钮或 SAVE_DB 按钮来实现。

9.3.2.3 创建几何模型

step 1

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions 命令，弹出 Create Block by Dimensions 对话框，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中输入 0、0.08，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中输入 0、0.12，在 Z1,Z2 Z-coordinates 输入栏中输入 0、-0.005，如图 9.16 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

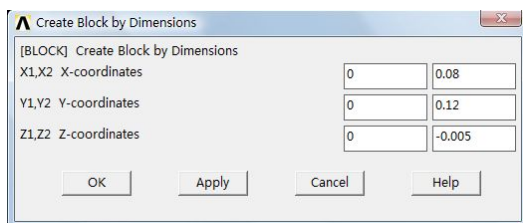


图 9.16 Create Block by Dimensions 对话框

step 2

选择 Utility Menu→PlotCtrls→View Setting→Viewing Direction 命令，弹出 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，如图 9.17 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。此时，ANSYS 显示窗口显示如图 9.18 所示的生成块体的结果。

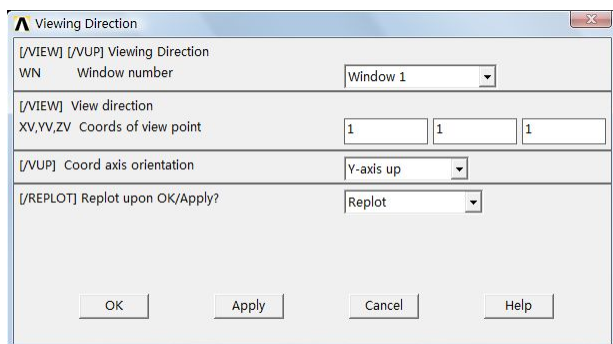


图 9.17 Viewing Direction 对话框

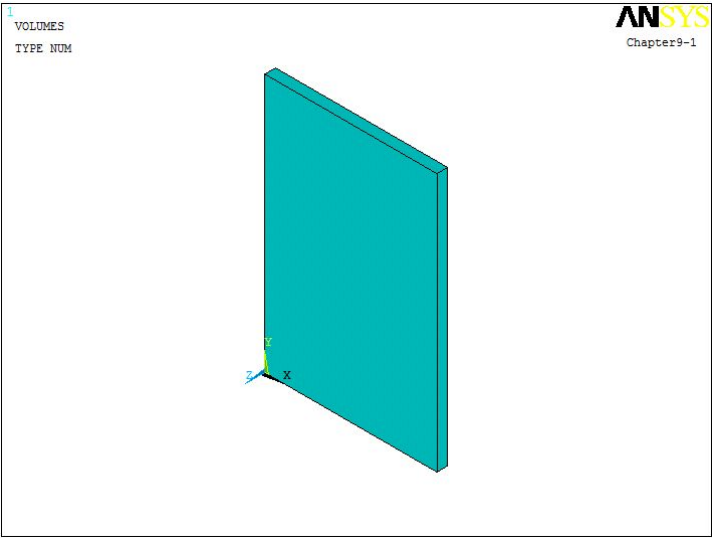


图 9.18 生成块体的结果



改变视图也可以通过单击快捷菜单中的  图标来完成。

step 3 选择 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Cylinder → Solid Cylinder 命令，弹出 Solid Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入 0.04，在 WP Y 输入栏中输入 0.04，在 Radius 输入栏中输入 0.01，在 Depth 输入栏中输入 -0.005，如图 9.19 a)所示，单击 Apply 按钮创建第一个小圆柱体。继续在 Solid Cylinder 对话框中设置参数，在 WP X 输入栏中输入 0.04，在 WP Y 输入栏中输入 0.08，在 Radius 输入栏中输入 0.01，在 Depth 输入栏中输入 -0.005，如图 9.19 b) 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，同时创建第二个小圆柱体。此时，ANSYS 显示窗口显示如图 9.20 所示的生成两个小圆柱体后的结果。

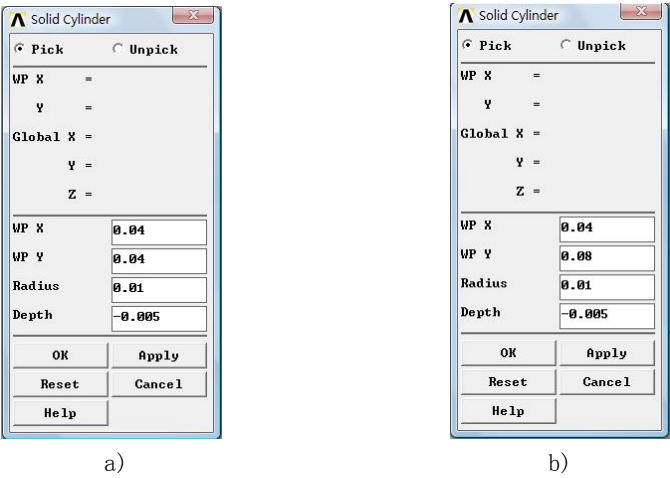


图 9.19 Solid Cylinder 对话框

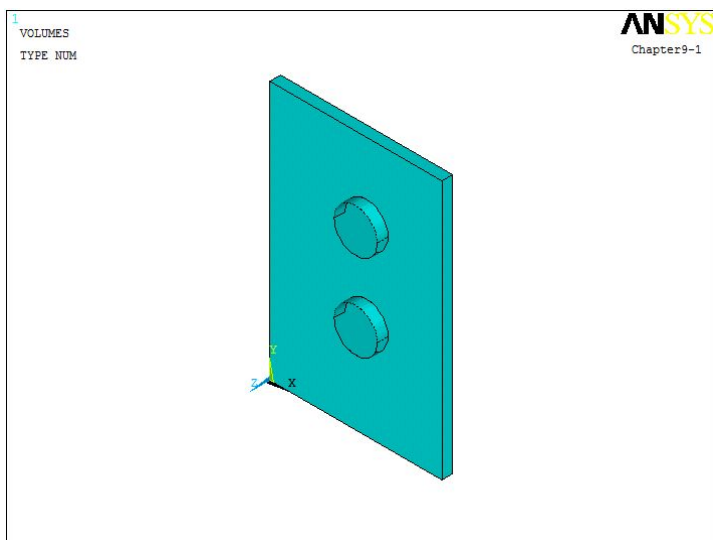
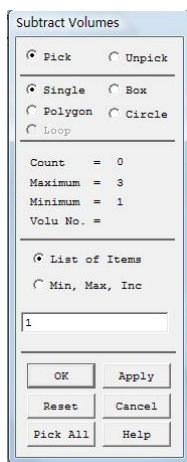


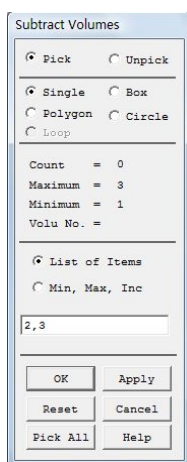
图 9.20 生成两个小圆柱体后的结果

step 4

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Volumes 命令，弹出 Subtract Volumes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，如图 9.21 a) 所示，单击 Apply 按钮，再在输入栏中输入 2, 3，如图 9.21 b) 所示，单击 OK 按钮关闭该拾取菜单。



a)



b)

图 9.21 Subtract Volumes 拾取菜单



此操作为布尔体相减操作，也可通过鼠标进行拾取，拾取时需将鼠标置于体的中心。

step 5

选择 Utility Menu→Plot→Volumes 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.22 所示的体相减后的结果。

step 6

选择 Utility Menu→Workplane→Display Working Plane 命令，在 ANSYS 显示窗口中显示工作平面。

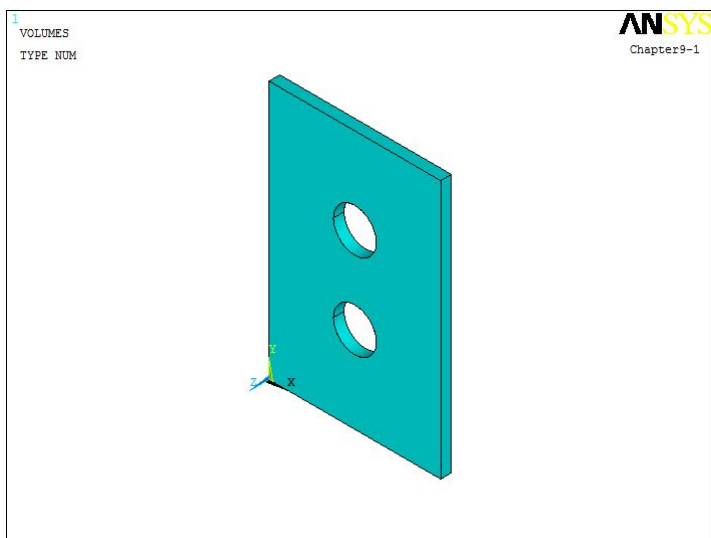


图 9.22 体相减后的结果

step 7

选择 **Utility Menu**→**Workplane**→**Offset WP by Increments** 命令，弹出 **Offset WP** 拾取菜单，在 **X,Y,Z Offsets** 输入栏中输入 **0,0.12, -0.005**，如图 9.23 所示，单击 **OK** 按钮关闭该拾取菜单。移动工作平面后，ANSYS 显示窗口的显示结果如图 9.24 所示。

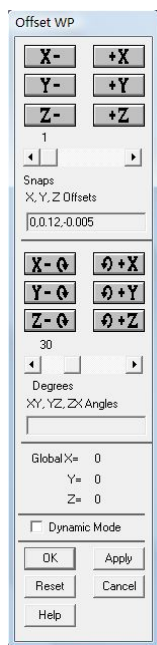


图 9.23 Offset WP 拾取菜单

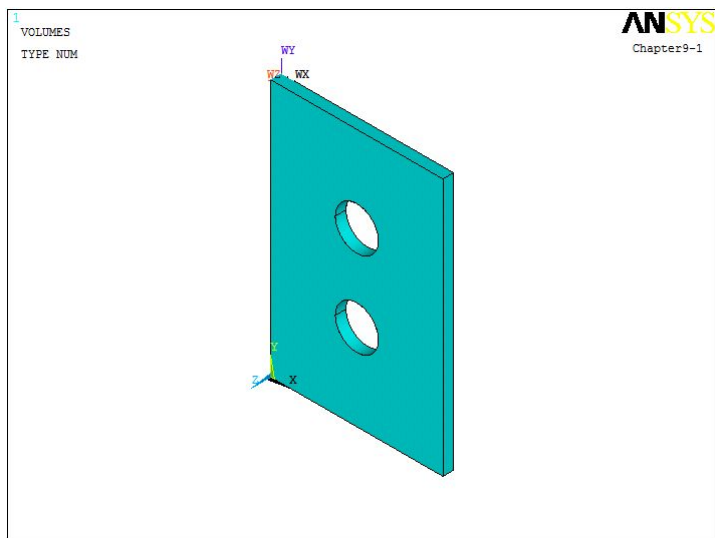


图 9.24 移动工作平面后的结果



此操作为移动工作平面，也可通过选择 **Utility Menu**→**Workplane**→**Offset WP to**→**Keypoints**+命令，然后利用鼠标拾取图中位置的关键点来完成。

step 8

选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Block**→**By Dimensions** 命

令，弹出 **Create Block by Dimensions** 对话框，在 **X1,X2 X-coordinates** 输入栏中输入 0、0.08，在 **Y1,Y2 Y-coordinates** 输入栏中输入 0、0.005，在 **Z1,Z2 Z-coordinates** 输入栏中输入 0、0.12，如图 9.25 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

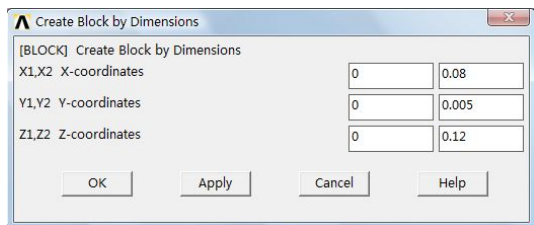


图 9.25 Create Block by Dimensions 对话框

step 9 选择 **Utility Menu**→**Workplane**→**Display Working Plane** 命令，在 ANSYS 显示窗口中不显示工作平面。

step 10 选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**View Setting**→**Viewing Direction** 命令，弹出 **Viewing Direction** 对话框，在 **XV,YV,ZV Coords of view point** 输入栏中输入 -1、1、1，其余选项采用默认设置，如图 9.26 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。此时，ANSYS 显示窗口显示如图 9.27 所示的生成另一个块体后的结果。

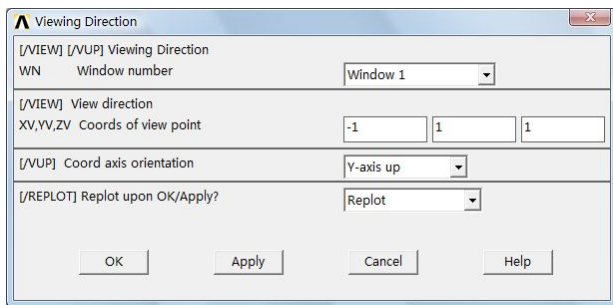


图 9.26 Viewing Direction 对话框

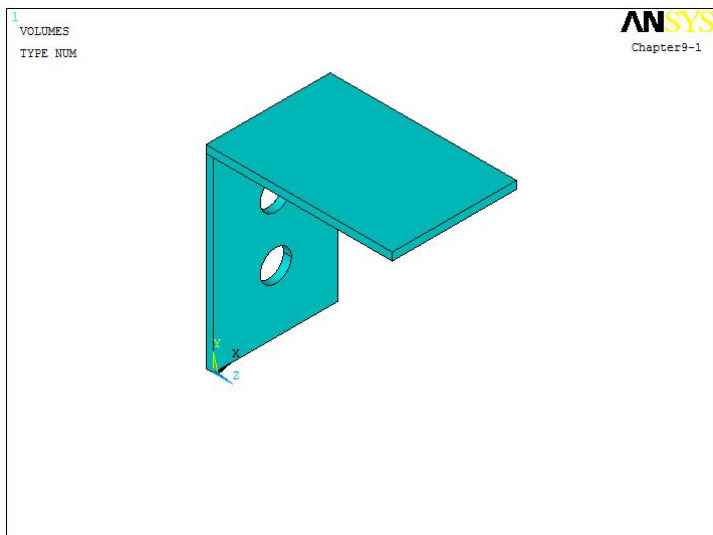


图 9.27 生成另一个块体后的结果



step 11

选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Numbering** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，选中 **KP Keypoint numbers** 复选框，使其状态由 **Off** 变为 **On**，如图 9.28 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

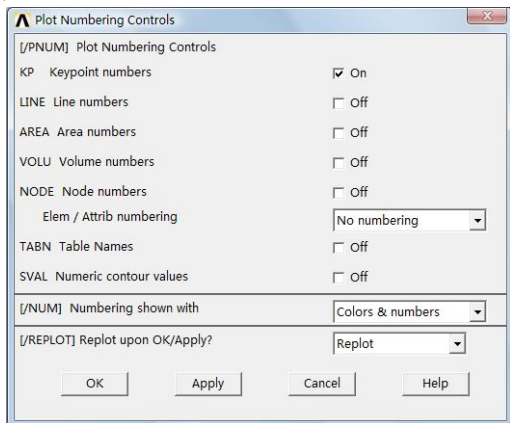


图 9.28 Plot Numbering Controls 对话框



此操作为显示关键点编号。

step 12

选择 **Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs** 命令，弹出 **Create Area thru KPs** 拾取菜单，在输入栏中输入 **9,16,13,5,2**，如图 9.29 所示，单击 **OK** 按钮关闭该拾取菜单。

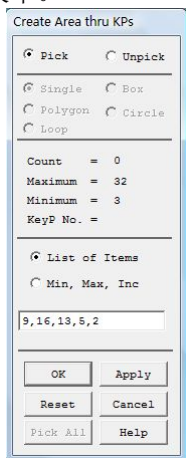


图 9.29 Create Area thru KPs 拾取菜单



此操作为通过关键点创建面，也可通过用鼠标直接拾取关键点来实现。



在输入栏输入关键点编号时，应按顺时针顺序或逆时针顺序输入，不能打乱顺序。通过鼠标拾取关键点生成面时，也应按顺时针顺序或逆时针顺序依次拾取，不能交叉拾取。



step 13 选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Numbering** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，取消选中 **KP Keypoint numbers** 复选框，使其状态由 **On** 变为 **Off**，选中 **AREA Area numbers** 复选框，使其状态由 **Off** 变为 **On**，如图 9.30 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

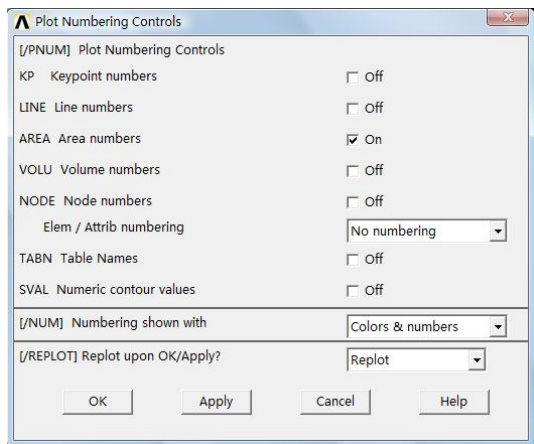


图 9.30 Plot Numbering Controls 对话框

step 14 选择 **Utility Menu→Plot→Areas** 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.31 所示的面结果。

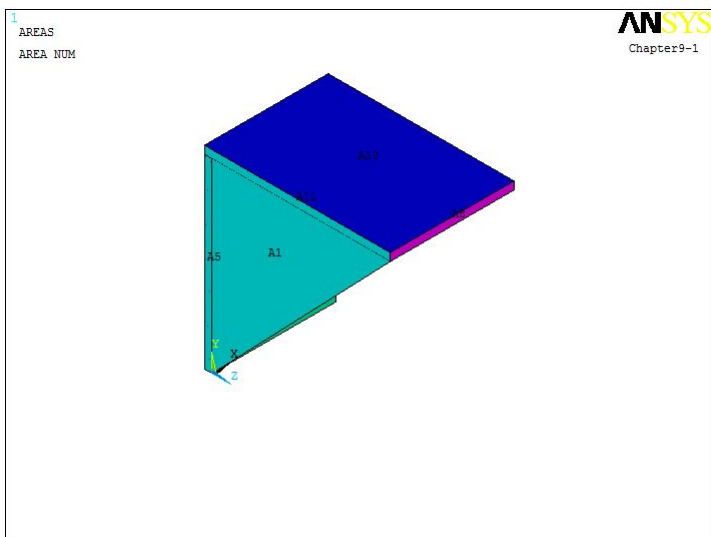


图 9.31 生成面后的结果

step 15 选择 **Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→By XYZ Offset** 命令，弹出 **Extrude Areas by Offset** 拾取菜单，在输入栏中输入 1，如图 9.32 所示，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Extrude Areas by XYZ Offset** 对话框，在 **DX,DY,DZ Offsets for extrusion** 输入栏中输入 -0.005、0、0，如图 9.33 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 16 选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Numbering** 命令，出现 **Plot Numbering Controls** 对话框，取消选中 **AREA Area numbers** 复选框，使其状态由 **On** 变为 **Off**，选中 **VOLU Volume numbers** 复选框，使其状态由 **Off** 变为 **On**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

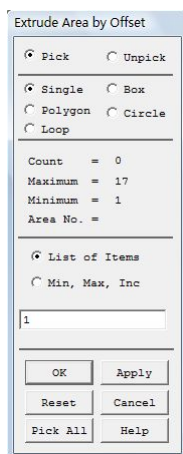


图 9.32 Extrude Area by Offset 拾取菜单

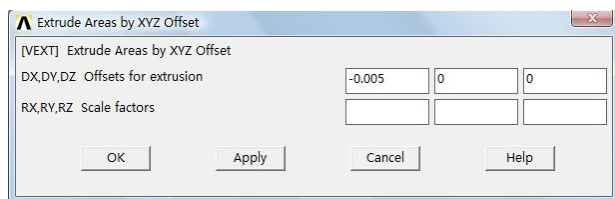


图 9.33 Extrude Areas by XYZ Offset 对话框

step 17 选择 **Utility Menu**→**Plot**→**Volumes** 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.34 所示的立体钢架几何模型。

step 18 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Operate**→**Booleans**→**ADD**→**Volumes** 命令，弹出 **Add Volumes** 拾取菜单，单击 **Pick All** 按钮，如图 9.35 所示。

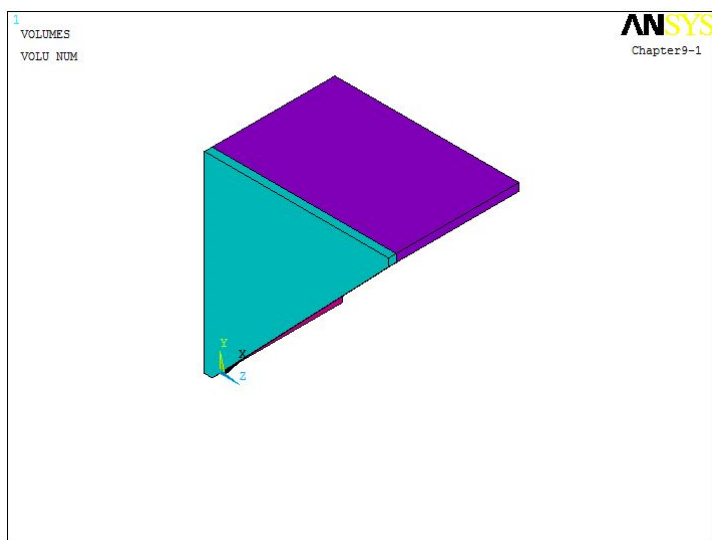


图 9.34 立体钢架几何模型

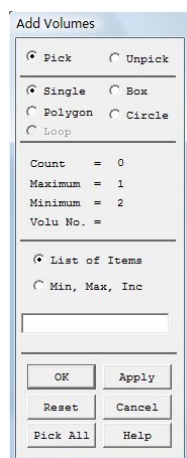


图 9.35 Add Volumes 拾取菜单

step 19 选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，取消选中 **VOLU Volume numbers** 复选框，使其状态由 **On** 变为 **Off**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 20 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Numbering Ctrl**s→**Compress Items** 命令，弹出 **Compress Numbers** 对话框，在 **Label Item to be compressed** 下拉列表框中选择 **All** 选项，如图 9.36 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。



此操作为压缩关键点、线、面和体的编号，使其连续。

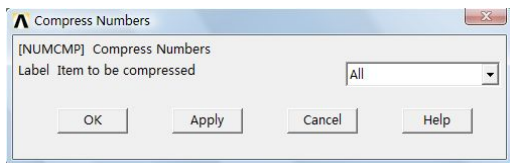


图 9.36 Compress Numbers 对话框

step 21 选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

9.3.2.4 划分网格

step 1 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**ManualSize**→**Global**→**Size** 命令，弹出 **Global Element Sizes** 对话框，在 **SIZE Element edge length** 输入栏中输入 0.005，如图 9.37 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

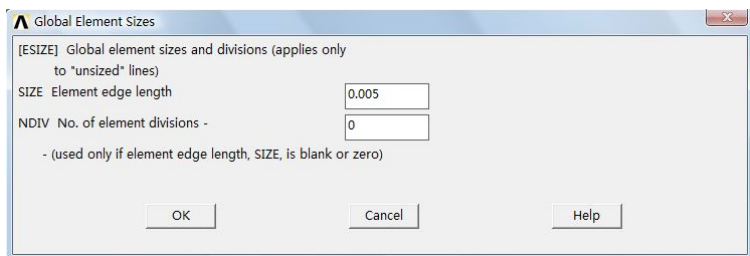


图 9.37 Global Element Sizes 对话框

step 2 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Volumes**→**Free** 命令，弹出 **Mesh Volumes** 拾取菜单，如图 9.38 所示，用鼠标在 **ANSYS** 显示窗口中选择钢架，单击 **OK** 按钮关闭该拾取菜单。

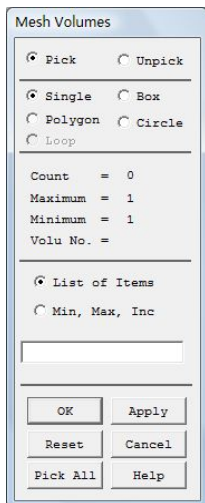


图 9.38 Mesh Volumes 拾取菜单



定义单元尺寸之后进行自由网格划分。

step 3 选择 **Utility Menu**→**Plot**→**Elements** 命令，**ANSYS** 显示窗口将显示如图 9.39 所示的立体

钢架单元划分结果，即有限元模型。

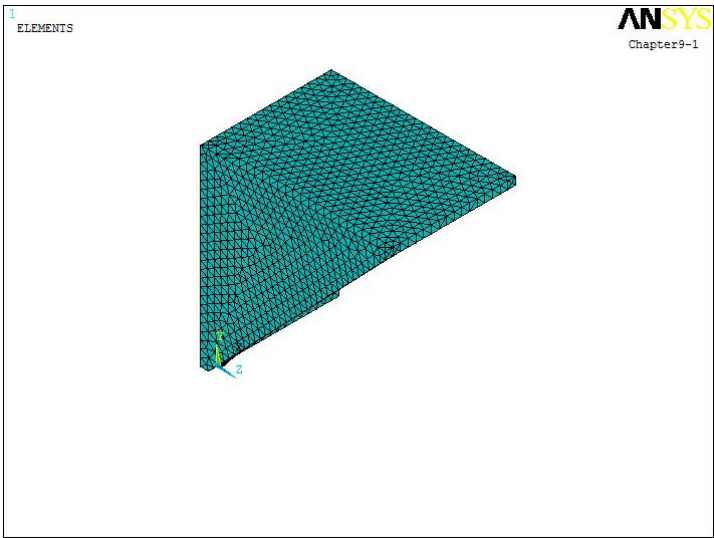


图 9.39 立体钢架单元划分结果

step 4 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

9.3.2.5 加载求解

step 1 选择 Utility Menu→PlotCtrls→View Setting→Viewing Direction 命令，弹出 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas 命令，弹出 Apply U,ROT on Areas 拾取菜单，如图 9.40 所示，用鼠标拾取 2 个圆孔的内表面，共 4 个半圆柱面，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，如图 9.41 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

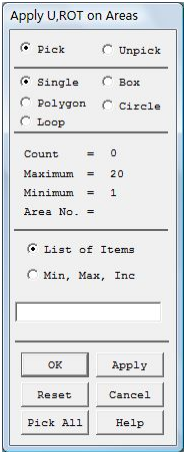


图 9.40 Apply U,ROT on Areas 拾取菜单

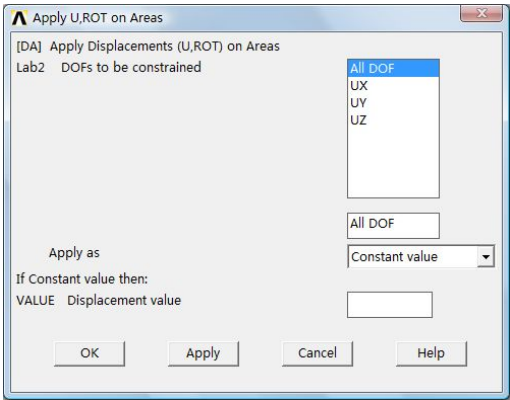


图 9.41 Apply U,ROT on Areas 对话框



此操作为对 2 个圆孔内表面进行固定约束，即不允许圆孔内表面有 X、Y、Z 3 个方向的位移。

step 3

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas 命令，弹出 Apply PRES on Areas 拾取菜单，如图 9.42 所示，用鼠标拾取钢架的上表面（一大一小两个上表面），单击 Apply 按钮，弹出 Apply PRES on areas 对话框，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 1000，如图 9.43 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。加载后的结果如图 9.44 所示。

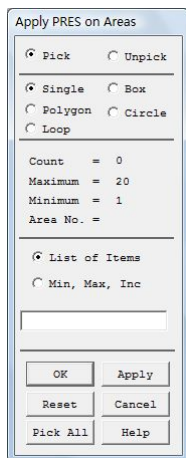


图 9.42 Apply PRES on Areas 拾取菜单

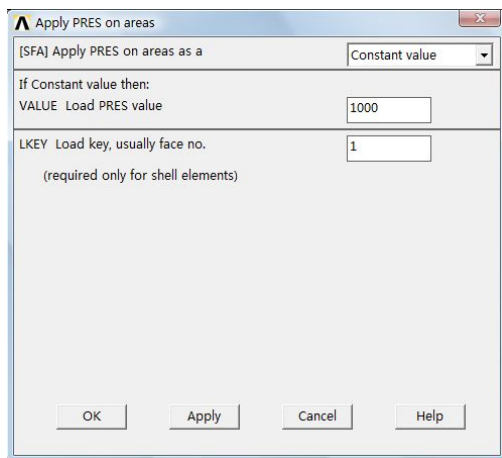


图 9.43 Apply PRES on areas 对话框

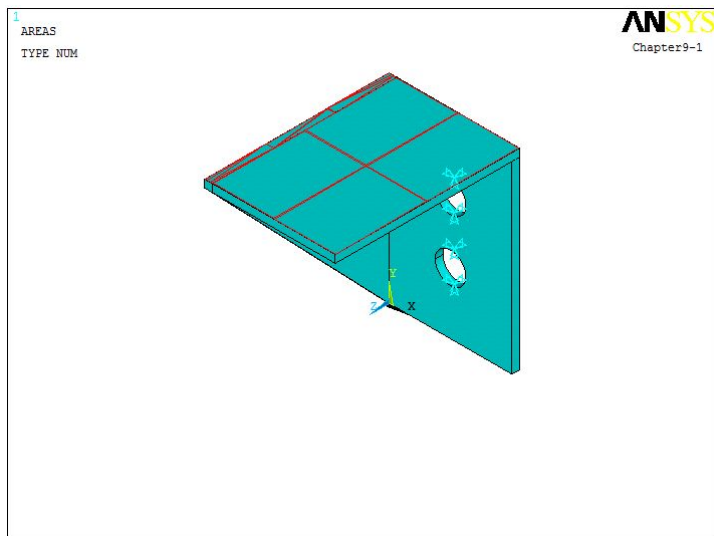


图 9.44 施加约束载荷后的结果



此操作为对钢架施加均布载荷，正值表示受压。

**step 4**

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令, 弹出 New Analysis 对话框, 在[ANTYPE] Type of analysis 栏中选择 Static 单选按钮, 如图 9.45 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

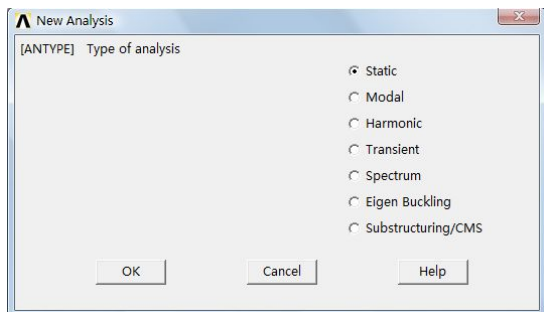


图 9.45 New Analysis 对话框

step 5

选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令, 弹出 Solve Current Load Step 对话框, 如图 9.46 所示, 单击 OK 按钮, ANSYS 开始求解计算。

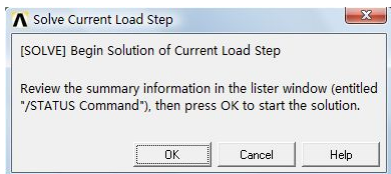


图 9.46 Solve Current Load Step 对话框

step 6

求解结束时, 弹出 Note 对话框, 如图 9.47 所示, 单击 Close 按钮关闭该对话框。

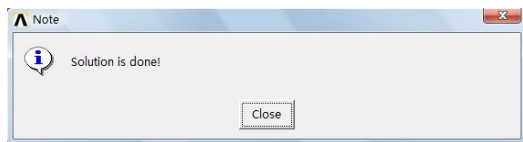


图 9.47 Note 对话框

step 7

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令, 保存上述操作过程。

9.3.2.6 查看求解结果

step 1

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框, 在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undef edge 单选按钮, 如图 9.48 所示, 单击 OK 按钮, ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的轮廓, 如图 9.49 所示。

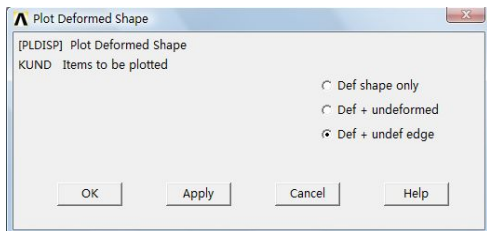


图 9.48 Plot Deformed Shape 对话框



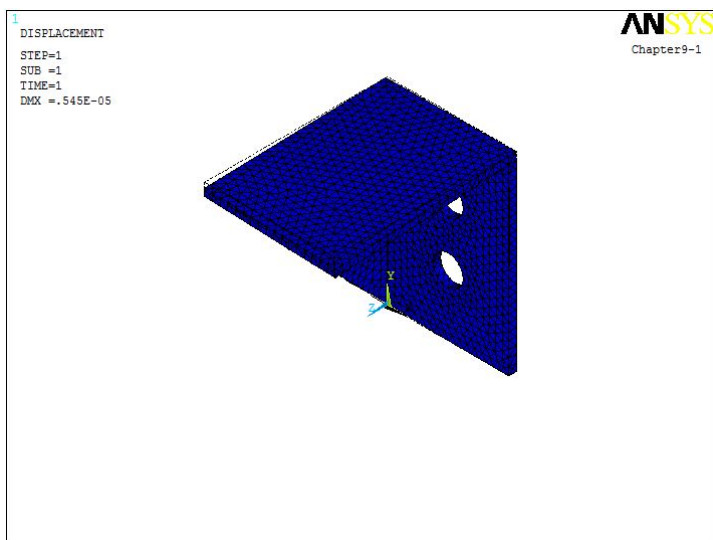


图 9.49 变形后的几何形状和未变形的轮廓

step 2

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，其余选项采用默认设置，如图 9.50 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.51 所示的位移场分布等值线图。

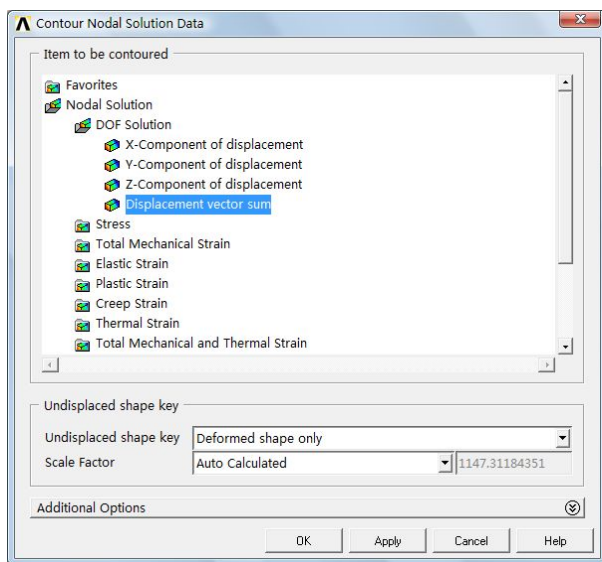


图 9.50 Contour Nodal Solution Data 对话框

step 3

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→Stress→von Mises stress 选项，其余选项采用默认设置，如图 9.52 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.53 所示的 Mises 等效应力场分布等值线图。

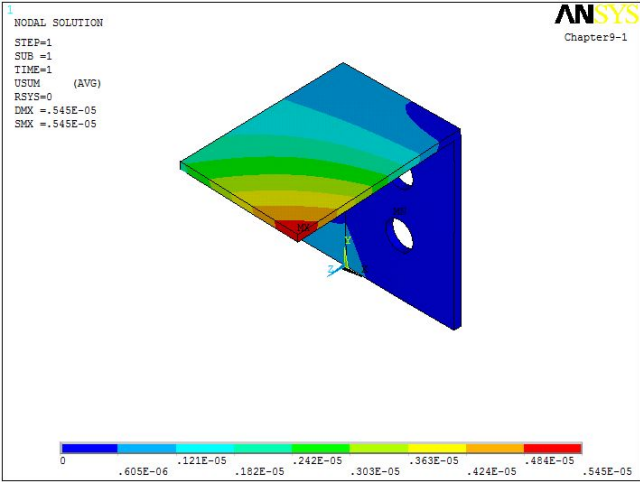


图 9.51 位移场分布等值线图

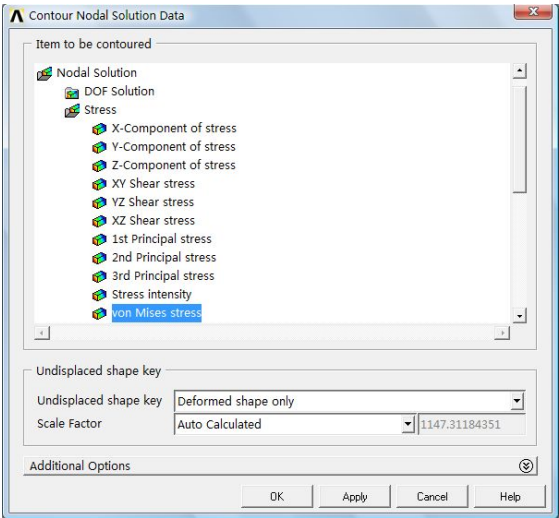


图 9.52 Contour Nodal Solution Data 对话框

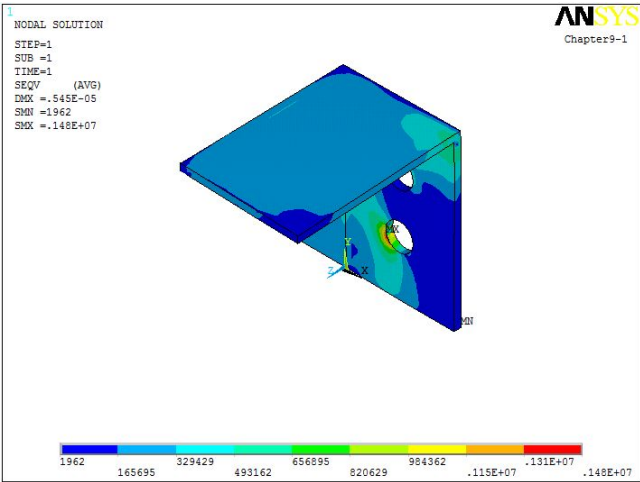


图 9.53 Mises 等效应力场分布等值线图

step 4

选择 **Utility Menu→File→Exit** 命令, 弹出 **Exit from ANSYS** 对话框, 选择 **Save Everything** 单选按钮, 如图 9.54 所示, 单击 **OK** 按钮, 关闭 ANSYS 程序。

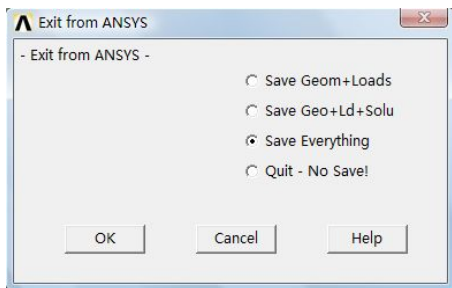


图 9.54 Exit from ANSYS 对话框

9.4 实体结构有限元分析实例详解 2: 轴承座的静力分析

本节实例为轴承座的静力分析, 通过学习要掌握的知识包括: 创建实体的方法, 工作平面的平移及旋转, 布尔运算 (相减、粘接、搭接), 模型体素的合并, 基本网格划分, 基本加载、求解及后处理。

9.4.1 问题描述与分析

本实例分析机械结构中常见的轴承座结构, 结构尺寸如图 9.55 所示, 载荷如图 9.56 所示, 材料的弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, 泊松比为 0.3。试计算轴承座结构的变形及 von Mises 应力分布。

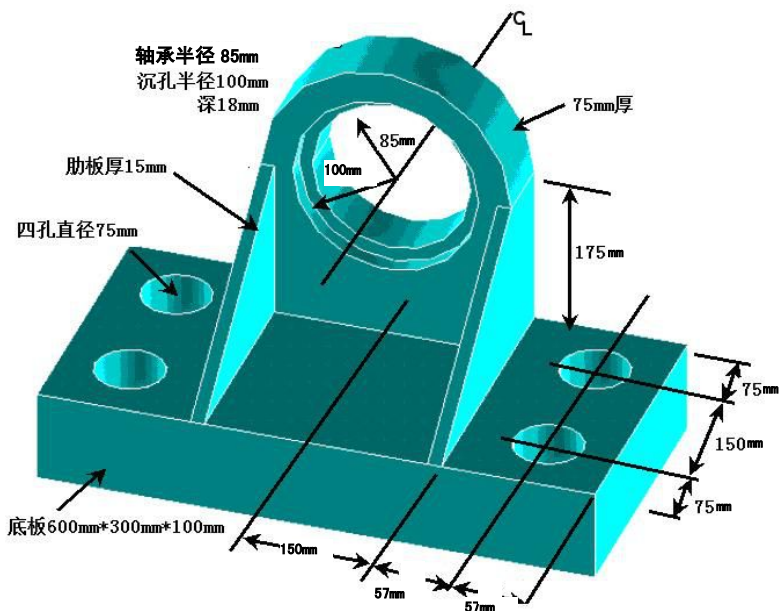


图 9.55 轴承座结构尺寸图

采用自顶向下和自底向上相结合的建模方法建立该实例的三维模型, 选择 **SOLID92** 单元划分网格, 单元长度控制为 **5mm**。

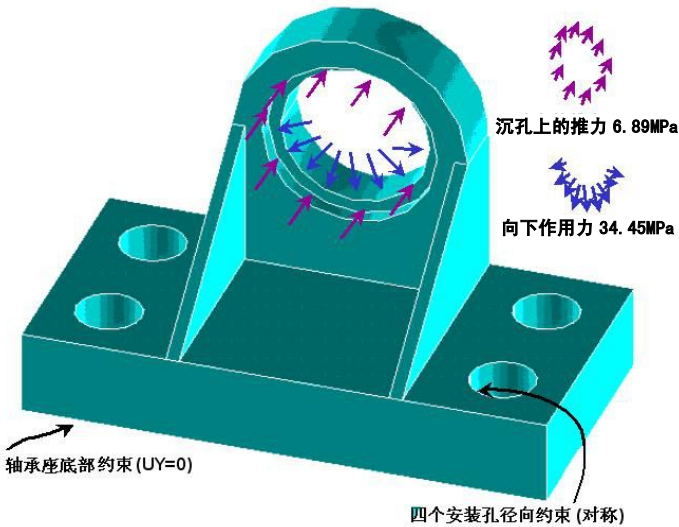


图 9.56 轴承座结构载荷图

9.4.2 求解过程

9.4.2.1 定义工作目录及文件名

step 1

启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，如图 9.57 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 9\9-2，在 Job Name 输入栏中输入工作文件名：Chapter9-2。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

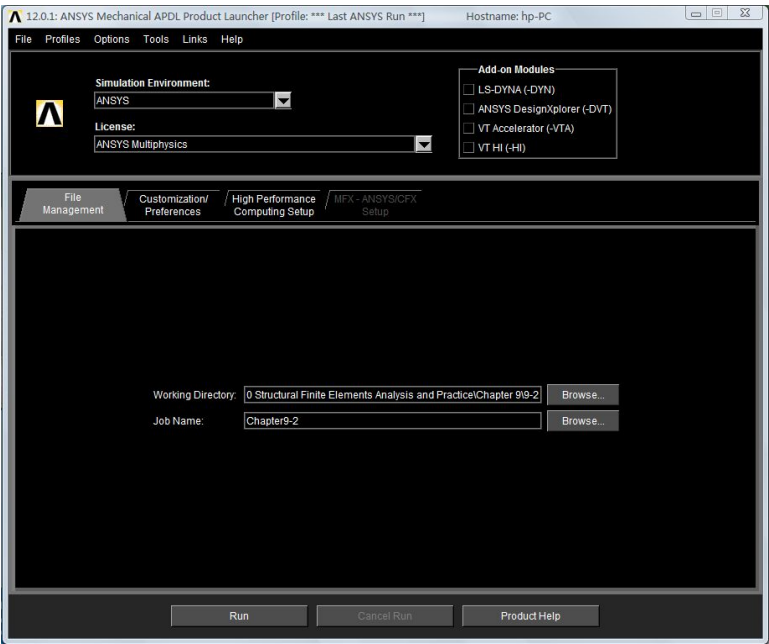


图 9.57 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口



可以先在目标文件位置建立工作目录，然后单击 Browse 按钮选择工作目录；也可以通过单击 Browse 按钮来选择工作文件名。

9.4.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1

选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，如图 9.58 所示，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

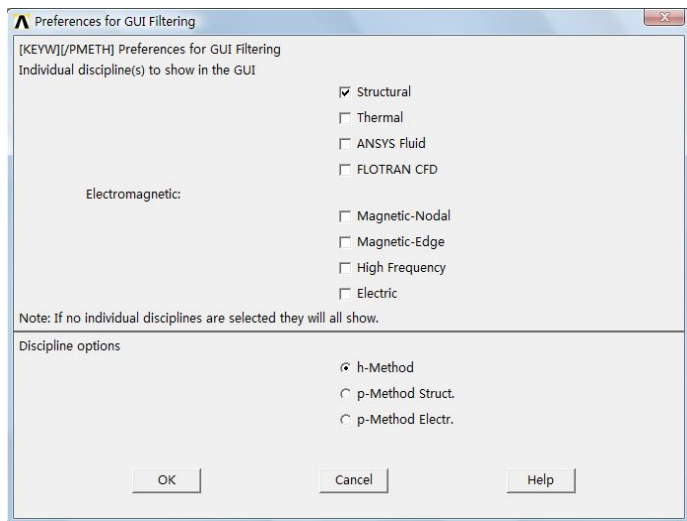


图 9.58 Preferences for GUI Filtering 对话框

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，如图 9.59 所示，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid 中的 Tet 10node 92 单元，如图 9.60 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

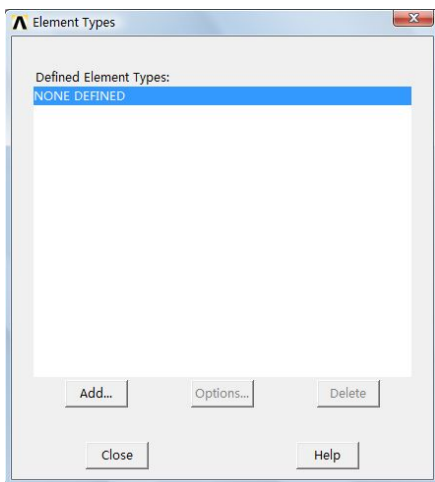


图 9.59 Element Types 对话框

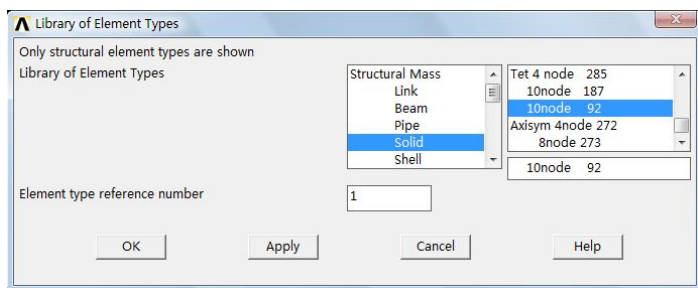


图 9.60 Library of Element Types 对话框



本章的两个实例均采用 SOLID92 单元进行分析，读者也可以采用其他三维实体单元进行本案例的分析，看看结果的异同。

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，如图 9.61 所示，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 $2.1\text{e}11$ ，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 9.62 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

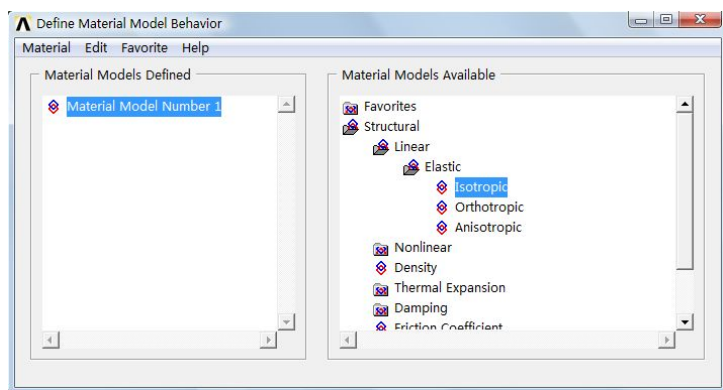


图 9.61 Define Material Model Behavior 对话框

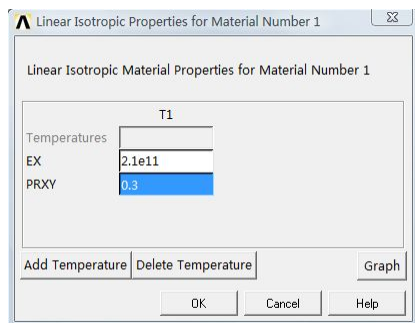


图 9.62 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 4

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。



此操作为保存，也可通过单击 按钮或 **SAVE_DB** 按钮来实现。

9.4.2.3 创建几何模型

step 1 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Block**→**By Dimensions** 命令，弹出 **Create Block by Dimensions** 对话框，在 **X1,X2 X-coordinates** 输入栏中输入 0、0.3，在 **Y1,Y2 Y-coordinates** 输入栏中输入 0、0.1，在 **Z1,Z2 Z-coordinates** 输入栏中输入 0、0.3，如图 9.63 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

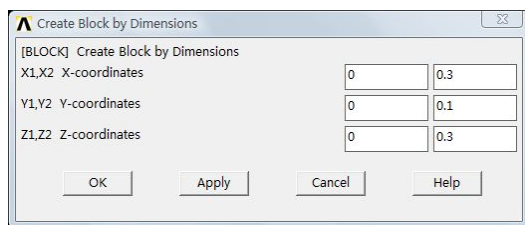


图 9.63 Create Block by Dimensions 对话框

step 2 选择 **Utility Menu**→**Workplane**→**Display Working Plane** 命令，在 ANSYS 显示窗口中显示工作平面。然后选择 **Utility Menu**→**Workplane**→**Offset WP by Increments** 命令，弹出 **Offset WP** 拾取菜单，在 **X,Y,Z Offsets** 输入栏中输入 0.225,0.125,0.075，在 **XY,YZ,ZX Angles** 输入栏中输入 0,-90,0，如图 9.64 所示，单击 **OK** 按钮关闭该拾取菜单。移动工作平面后，单击轴测图快捷按钮 ，此时 ANSYS 显示窗口的显示结果如图 9.65 所示。

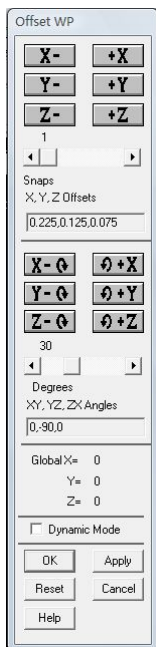


图 9.64 Offset WP 拾取菜单

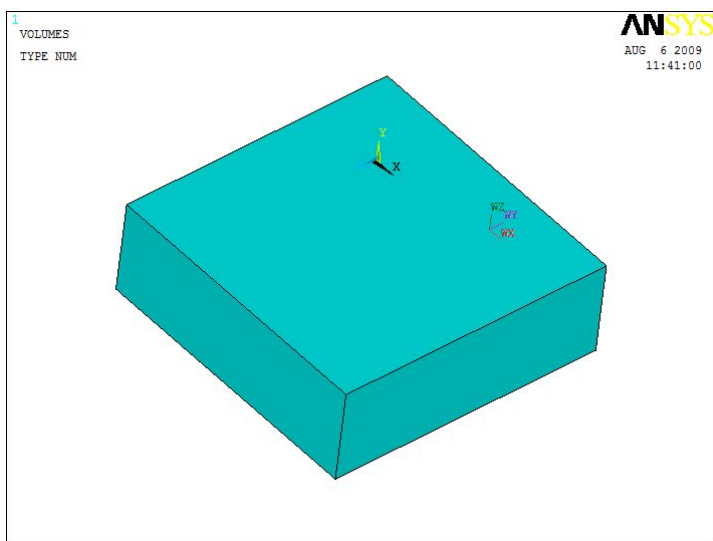


图 9.65 移动工作平面后的结果

step 3 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Cylinder**→**Solid Cylinder**

命令, 弹出 **Solid Cylinder** 对话框, 在 **Radius** 输入栏中输入 0.0375, 在 **Depth** 输入栏中输入 -0.15, 如图 9.66 所示。单击 **OK** 按钮创建第一个小圆柱体, 如图 9.67 所示。

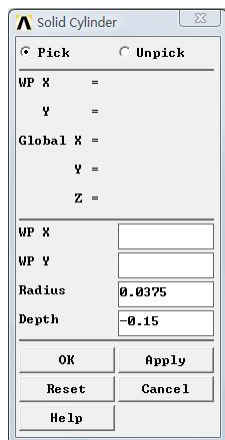


图 9.66 Solid Cylinder 对话框

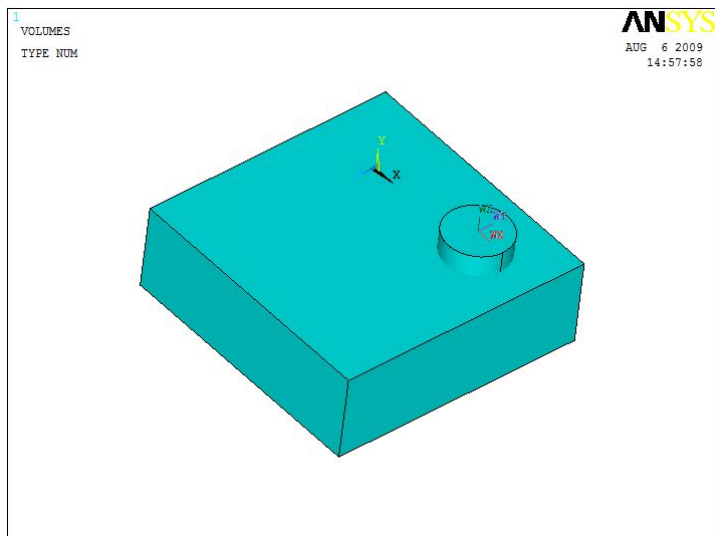


图 9.67 创建第一个小圆柱体后的结果

step 4

复制生成另一个圆柱体。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Copy**→**Volume** 命令, 弹出 **Copy Volumes** 对话框, 拾取圆柱体, 单击 **Apply** 按钮, 然后继续在 **Copy Volumes** 对话框中设置参数, 在 **DZ** 输入栏中输入 0.15, 如图 9.68 所示, 单击 **OK** 按钮, 此时 ANSYS 显示窗口的显示结果如图 9.69 所示。

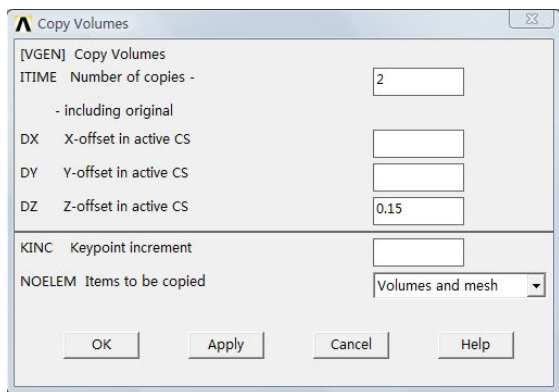


图 9.68 Copy Volumes 对话框

step 5

从长方体中减去两个圆柱体。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Operate**→**Booleans**→**Subtract**→**Volumes** 命令, 弹出 **Subtract Volumes** 拾取菜单, 首先拾取被减的长方体, 单击 **Apply** 按钮, 然后拾取减去的两个圆柱体, 单击 **OK** 按钮关闭该拾取菜单, 操作后的结果如图 9.70 所示。

step 6

移动工作平面。选择 **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Offset WP to**→**Keypoints+**命令, 弹出 **Offset WP to Keypoints** 拾取菜单, 直接拾取立方体左上角的关键点, 单击 **OK** 按钮, 结果如图 9.71 所示。

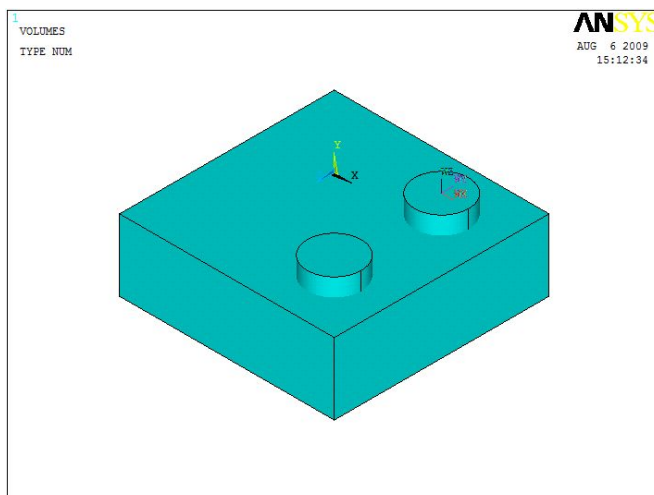


图 9.69 生成另一个小圆柱体后的结果

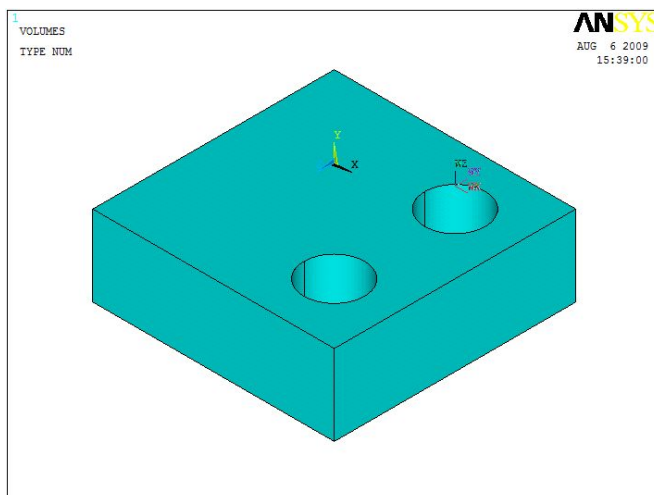


图 9.70 从长方体中减去两个圆柱体后的结果

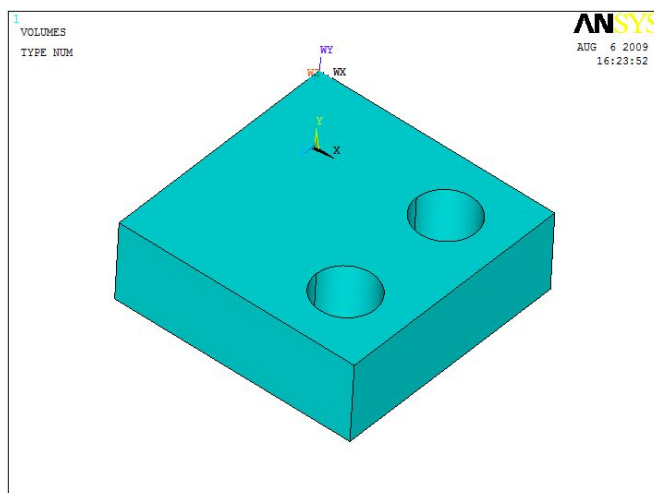


图 9.71 移动工作平面后的结果



此操作为移动工作平面，也可通过选择 Utility Menu→Workplane→Offset WP by Increments 命令来完成。

step 7

创建支撑部分。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By 2 corners & Z 命令，弹出 Block By 2 Corners & Z 对话框，在 Width, Height, Depth 输入栏中分别输入 0.15,0.175,0.075，如图 9.72 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。此时，ANSYS 显示窗口的显示结果如图 9.73 所示。

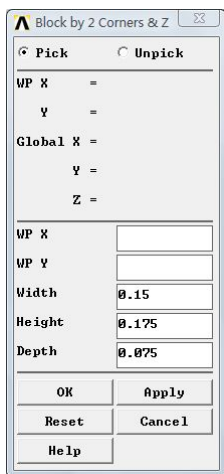


图 9.72 Block By 2 Corners & Z 对话框

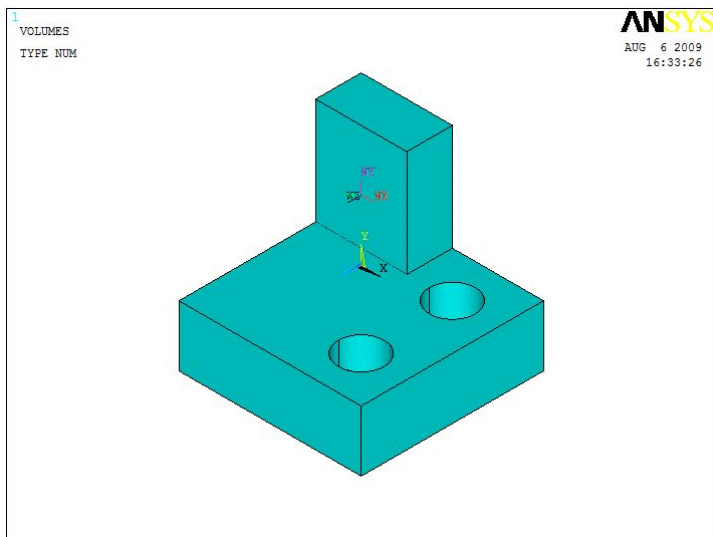



图 9.73 创建支撑部分后的结果

step 8

移动工作平面到轴瓦支架的前表面。选择 Utility Menu→WorkPlane→ Offset WP to→Keypoints+命令，弹出 Offset WP to Keypoints 拾取菜单，直接拾取刚刚创建的立方体的左前角关键点，单击 OK 按钮。然后单击 ANSYS Toolbar 工具栏上的 SAVE_DB 按钮，保存上述操作过程。

step 9

创建轴瓦支架的上部。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Partial Cylinder 命令，弹出 Partial Cylinder 对话框，在 Rad-1,Theta-1,Rad-2, Theta-2,Depth 输入栏中分别输入 0, 0, 0.15, 90,-0.075，如图 9.74 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击适合窗口快捷按钮 ，此时 ANSYS 显示窗口的显示结果如图 9.75 所示。

step 10

在轴承孔的位置创建圆柱体为用布尔操作生成轴孔做准备。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volume→Cylinder→Solid Cylinder 命令，弹出 Solid Cylinder 对话框，在 Radius, Depth 输入栏分别输入 0.1, -0.018，单击 Apply 按钮，继续在 Radius, Depth 输入栏分别输入 0.085, -0.2，如图 9.76 所示，单击 OK 按钮。结果如图 9.77 所示。

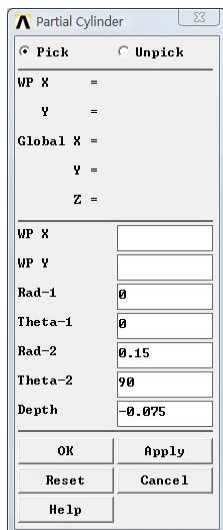


图 9.74 Partial Cylinder 对话框

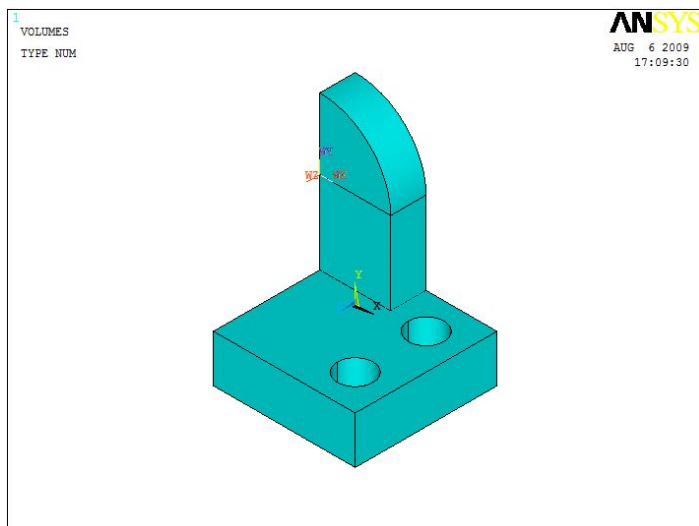


图 9.75 创建轴瓦支架的上部

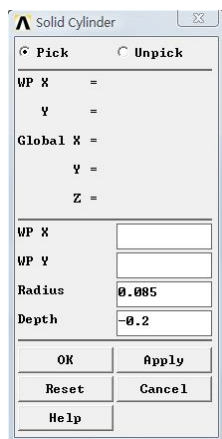
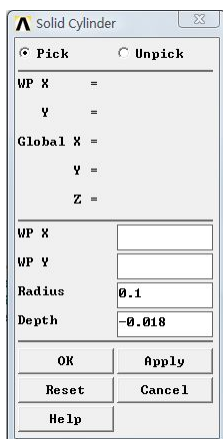


图 9.76 Solid Cylinder 对话框

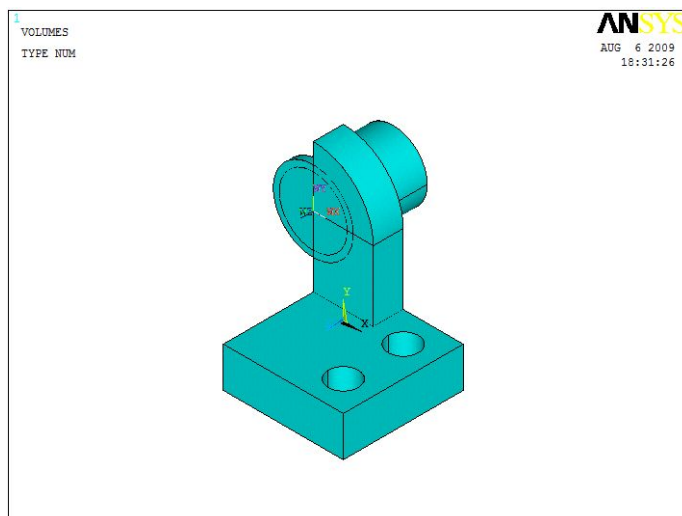


图 9.77 创建圆柱体后的结果



step 11

从轴瓦支架“减”去圆柱体形成轴孔。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Operate**→**Booleans**→**Subtract**→**Volumes** 命令, 弹出 **Subtract Volumes** 拾取菜单, 拾取构成轴瓦支架的两个体, 作为布尔“减”操作的母体, 单击 **Apply** 按钮, 拾取大圆柱体作为“减”去的对象, 单击 **Apply** 按钮。再次拾取构成轴瓦支架的两个体, 作为布尔“减”操作的母体, 单击 **Apply** 按钮, 然后拾取小圆柱体作为“减”去的对象, 单击 **OK** 按钮。执行布尔“减”操作后的结果如图 9.78 所示。单击 **ANSYS Toolbar** 工具栏上的 **SAVE_DB** 按钮, 保存上述操作。

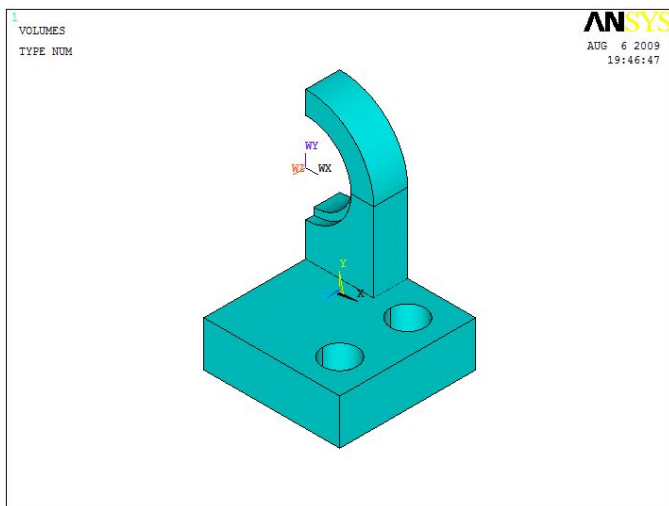


图 9.78 执行布尔“减”操作后的结果



在 Step11 所述的布尔操作中, 如果读者同时选择两个被“减”的母体, 然后同时选择两个“减”去的对象, 则会出现错误信息。所以单独选择“减”去的对象依次操作是必要的, 当然, 单独选择被“减”的母体, 同时选择两个“减”去的对象也是可以的。

step 12

合并重合的关键点。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Numbering Ctrl's**→**Merge Items** 命令, 弹出 **Merge Coincident or Equivalently Defined Items** 对话框, 在 **Label Type of item to be merge** 下拉列表框中选择 **Keypoints** 选项, 单击 **OK** 按钮, 如图 9.79 所示。

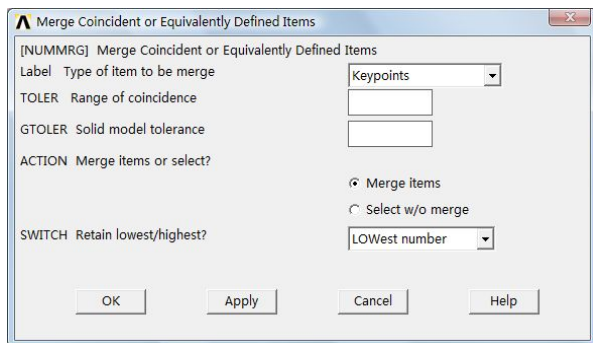


图 9.79 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框



此操作为合并选项操作，即将选项重新排序并按顺序编号，可以合并的选项还包括 Node，Elements 等。

step 13

在底座上部的前方边缘线的中点建立一个关键点。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→KP between KPs 命令，弹出 KP between KPs 拾取菜单，如图 9.80 所示，拾取图中所示的两个关键点，单击 OK 按钮，弹出 KBETween options 对话框，如图 9.81 所示，设置 RATI 为 0.5，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.82 所示的结果。

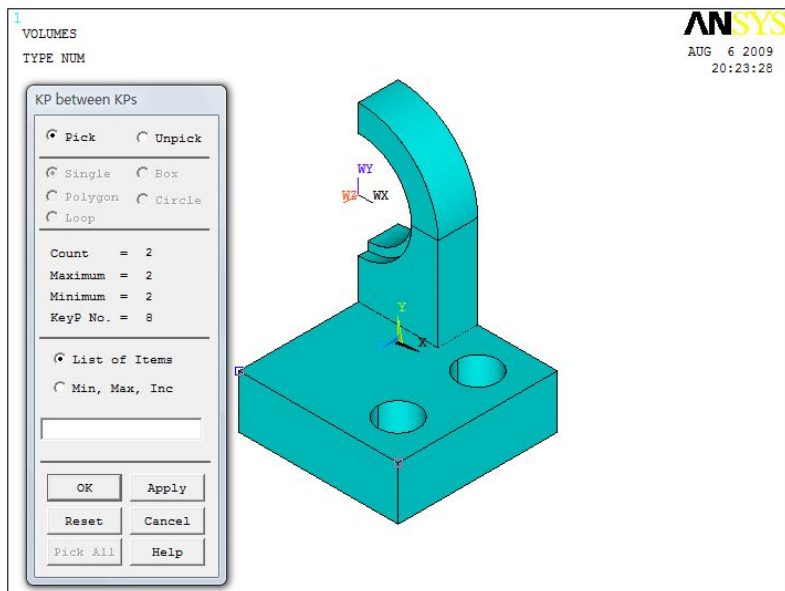


图 9.80 KP between KPs 拾取菜单及拾取关键点操作

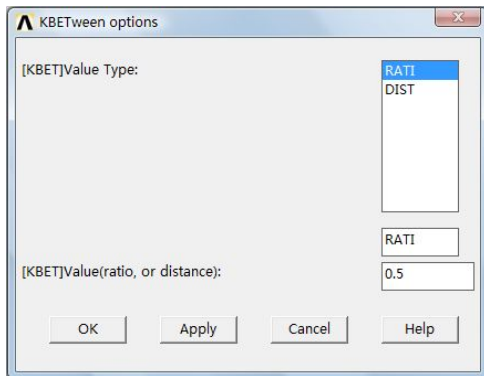


图 9.81 KBETween options 对话框

step 14

创建一个三角面。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs +命令，弹出 Create Area thru KPs 拾取菜单，如图 9.83 所示，依次拾取轴承孔座与整个基座的交点、轴承孔上下两个体的交点、基座上建立的关键点，单击 OK 按钮完成三角形侧面的建模，结果如图 9.84 所示。

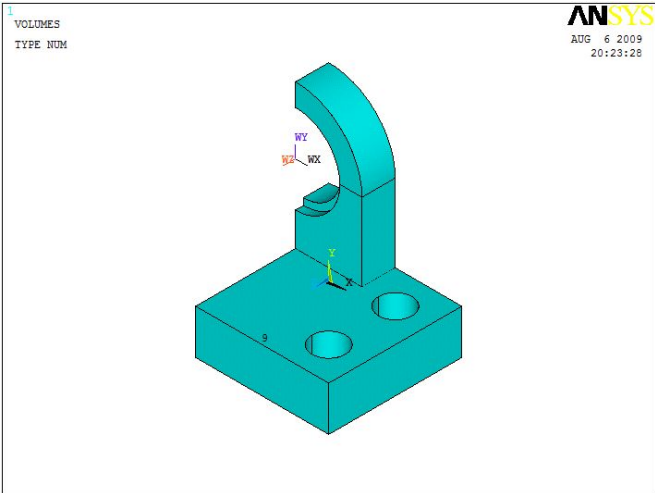


图 9.82 生成关键点后的结果

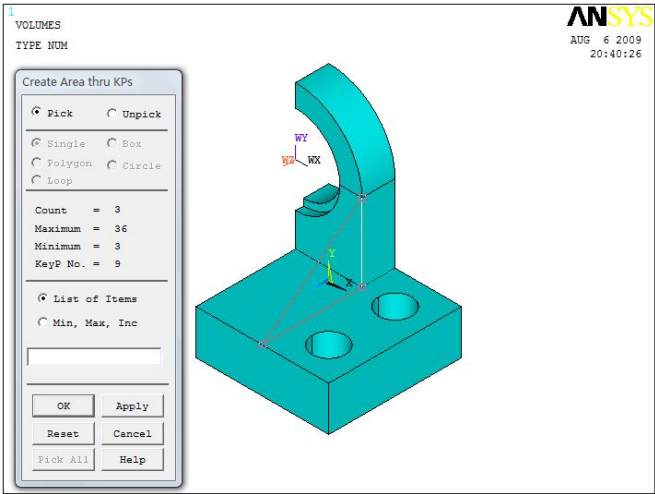


图 9.83 Create Area thru KPs 拾取菜单及拾取点操作

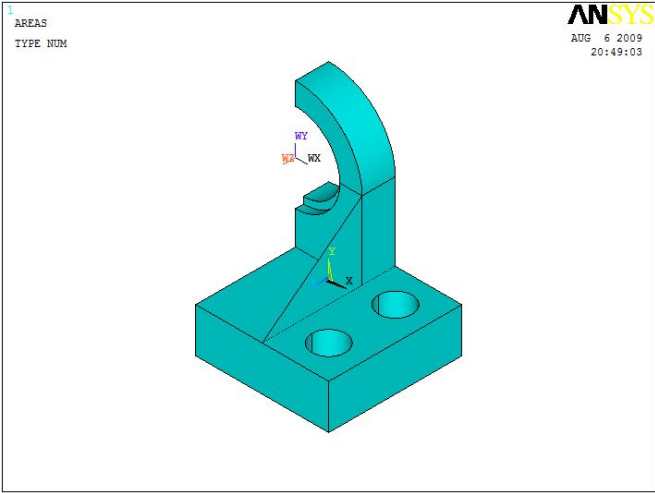


图 9.84 生成三角形侧面后的结果



此时如果滚动鼠标滚轮，则所建的三角形侧面将消失，不再显示。读者不要紧张，这是因为当前 ANSYS 窗口显示的是体素 (Volumes)，所建的面素将不显示。读者可选择 Utility Menu→Plot→Areas 命令，此时 ANSYS 窗口将会显示面素 (Areas)。

step 15 沿面的法向拖曳三角面形成一个三棱柱。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Normal 命令，弹出 Extrude Area by Norm 拾取菜单，拾取三角面，单击 OK 按钮，如图 9.85 所示。弹出 Extrude Area along Normal 对话框，在 DIST Length of extrusion 输入栏中输入-0.015，如图 9.86 所示，厚度的方向是向着轴承孔中心，单击 OK 按钮，结果如图 9.87 所示。

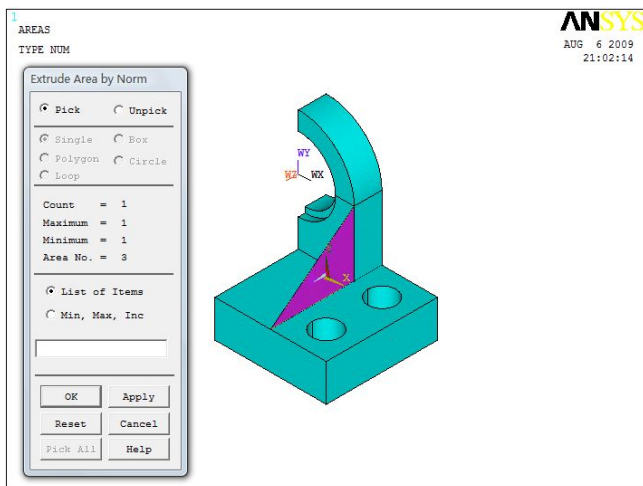


图 9.85 Extrude Area by Norm 拾取菜单及拾取三角面操作

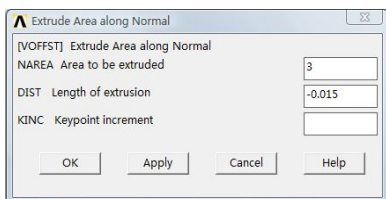


图 9.86 Extrude Area along Normal 对话框

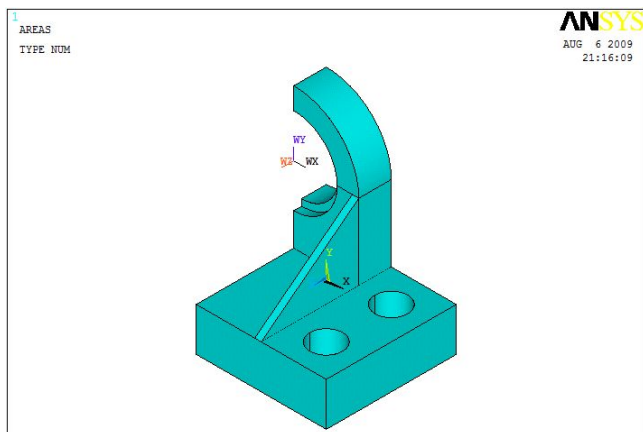


图 9.87 生成三棱柱后的结果

step 16

沿坐标平面镜像生成整个模型。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Reflect**→**Volumes** 命令，弹出 **Reflect Volumes** 拾取菜单，单击 **Pick All** 按钮，如图 9.88 所示，弹出 **Reflect Volumes** 对话框，选择 **Y-Z plane** 单选按钮，如图 9.89 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框，生成的整体模型如图 9.90 所示。单击 **ANSYS Toolbar** 工具栏上的 **SAVE_DB** 按钮，保存上述操作。

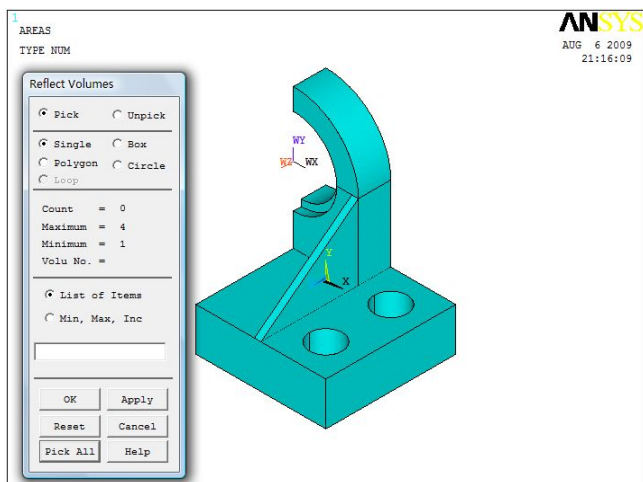


图 9.88 Reflect Volumes 拾取菜单

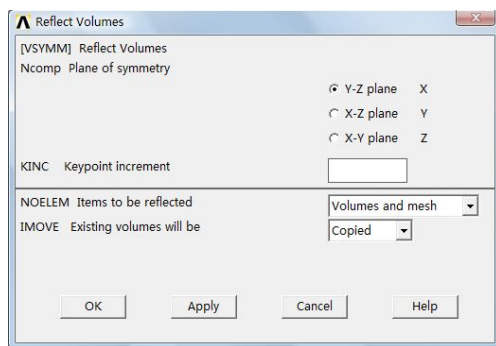


图 9.89 Reflect Volumes 对话框

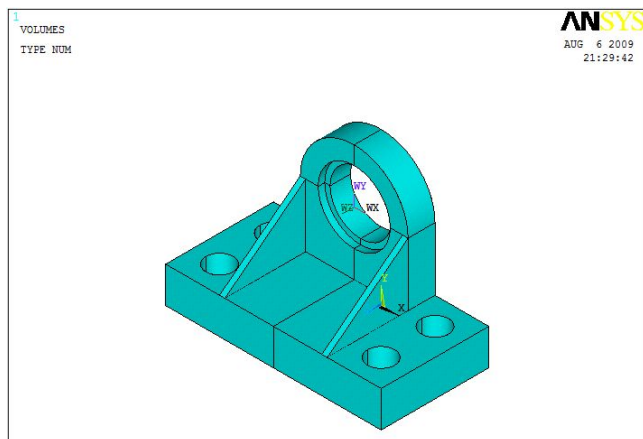


图 9.90 生成的整体模型

step 17 粘接所有体。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue →Volumes 命令，弹出 Glue Volumes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，如图 9.91 所示。

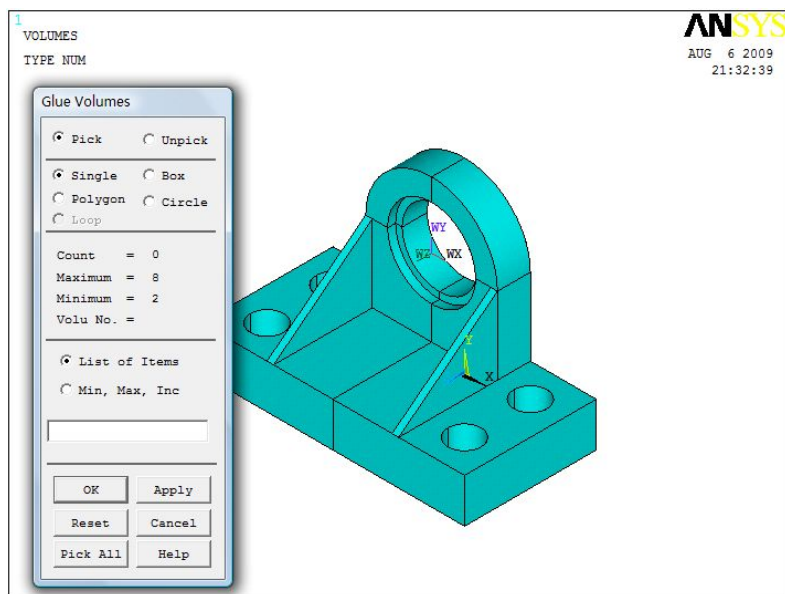


图 9.91 Glue Volumes 拾取菜单

step 18 选择 Main Menu → Preprocessor → Numbering Ctrl's → Compress Items 命令，弹出 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉列表框中选择 All 选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。



此操作为压缩关键点、线、面和体的编号，使其连续。

step 19 关闭 Display Working Plane。选择 Utility Menu→WorkPlane→Display Working Plane (toggle off)命令。

step 20 保存所有操作。选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

9.4.2.4 划分网格

step 1 用网格划分器 MeshTool 对几何模型进行单元划分。选择 Main Menu→Preprocessor→MeshTool 命令，弹出 MeshTool 对话框，选中 Smart Size（智能网络划分器）复选框，将网格密度设置为 1（可根据计算机的情况来选择网格密度的值。如果机器速度很快，可将其设置为小值来获得更密的网格；如果机器不快，请选择 5 以上的大值），在 Mesh 下拉列表框中选择 Volumes 选项，在 Shape 栏中选中 Tet 和 Free 两个单选按钮，如图 9.92 所示。单击 Mesh 按钮，弹出 Mesh Volumes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，如图 9.93 所示。



如果在网格划分过程中出现任何信息，单击 OK 或 Close 按钮。划分网格时网格密度可由滑动条控制，滑动条的调节范围为 0~10，当数值较大时网格稀疏，反之，网格紧密。

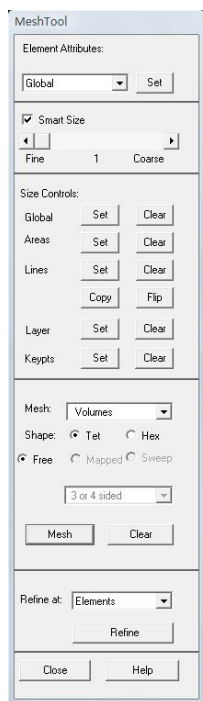


图 9.92 MeshTool 对话框

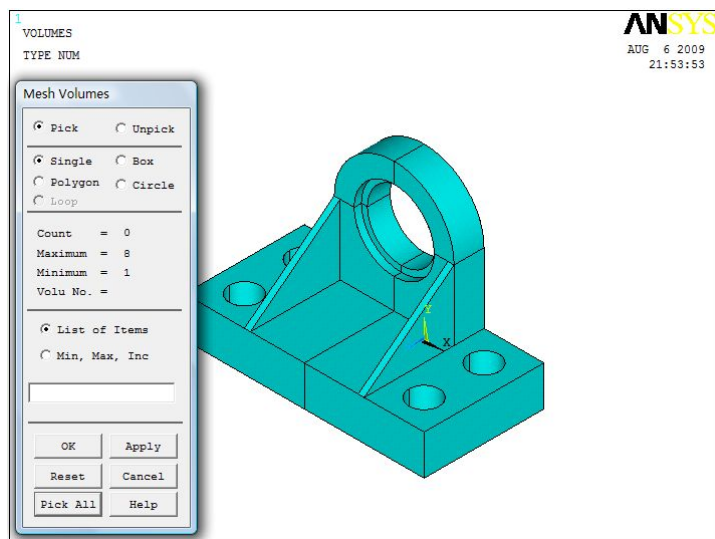


图 9.93 Mesh Volumes 拾取菜单

step 2

选择 **Utility Menu→Plot→Elements** 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.94 所示的轴承座单元划分结果，即有限元模型。

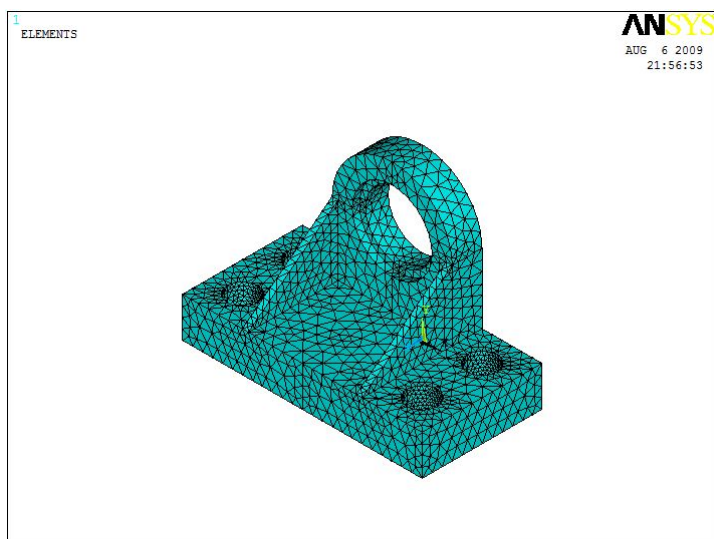


图 9.94 轴承座单元划分结果

step 3

选择 **Utility Menu→File→Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

9.4.2.5 加载求解

step 1

约束 4 个安装孔。选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C.→On Areas 命令，弹出 Apply SYMM on Areas 拾取菜单，拾取 4 个安装孔的 8 个柱面（每个圆柱面包括 2 个面），如图 9.95 所示，单击 OK 按钮。



在拾取时，按住鼠标的左键便有实体增亮显示，拖动鼠标时显示的实体会随之改变，此时松开左键即可选中此实体。

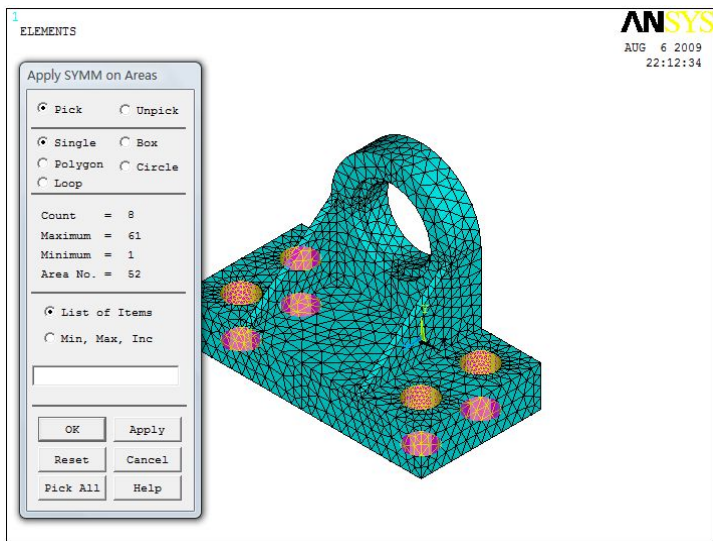


图 9.95 Apply SYMM on Areas 拾取菜单及拾取柱面操作

step 2

整个基座的底部施加位移约束 ($U_Y=0$)。选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines 命令，弹出 Apply U,ROT on Lines 拾取菜单，拾取基座底面的所有外边界线，如图 9.96 所示，拾取菜单中的 Count 等于 6，单击 OK 按钮。弹出 Apply U,ROT on Lines 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 U_Y ，如图 9.97 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

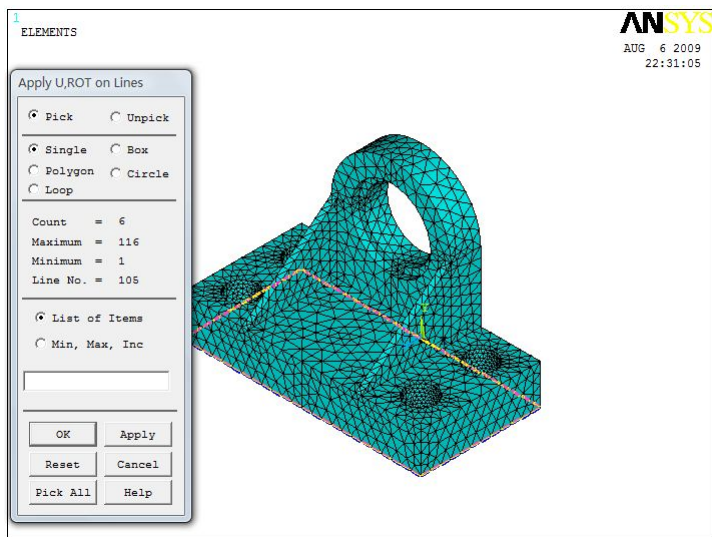


图 9.96 Apply U,ROT on Lines 拾取菜单及拾取外边界线操作

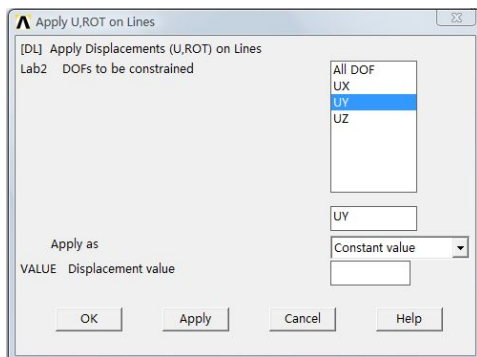


图 9.97 Apply U,ROT on Lines 对话框

step 3

在轴承孔圆周上施加推力载荷。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Pressure**→**On Areas** 命令，弹出 **Apply PRES on Areas** 拾取菜单，如图 9.98 所示，拾取轴承孔上宽度为 15mm 的所有面，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Apply PRES on areas** 对话框，在 **VALUE Load PRES value** 输入栏中输入 **6.89e6**，如图 9.99 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。加载后的结果如图 9.100 所示。

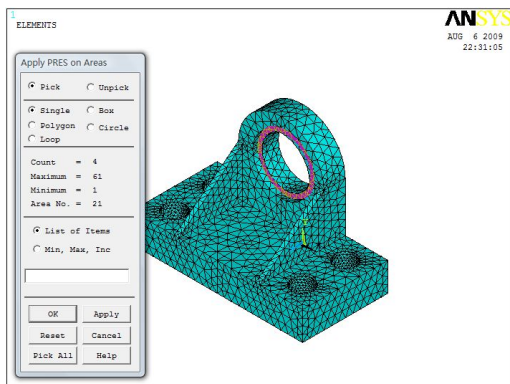


图 9.98 Apply PRES on Areas 拾取菜单及拾取面操作

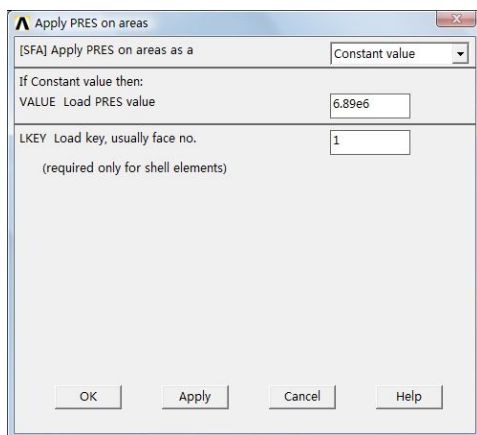


图 9.99 Apply PRES on areas 对话框

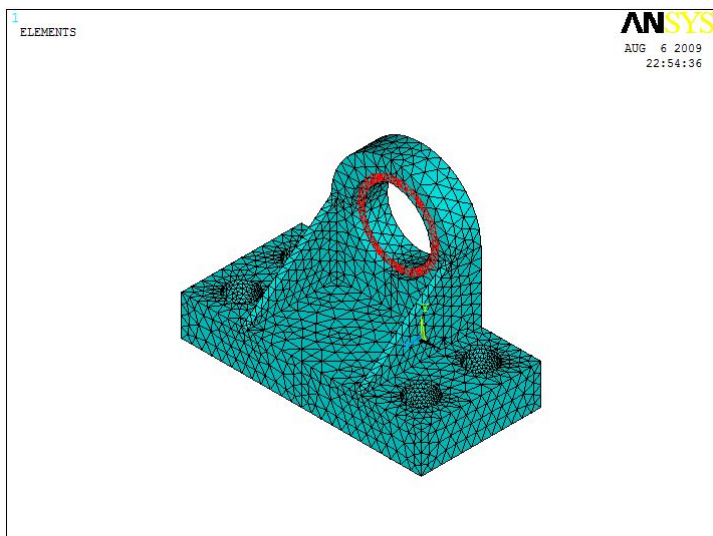


图 9.100 加载后的结果



此操作为对钢架施加均布载荷，正值表示受压。

step 4

在轴承孔的下半部分施加径向压力载荷，这个载荷是由于受重载的轴承受支撑作用而产生的。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Pressure**→**On Areas** 命令，弹出 **Apply PRES on Areas** 拾取菜单，如图 9.101 所示，拾取宽度为 18mm 的下面两个圆柱面，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Apply PRES on areas** 对话框，在 **VALUE Load PRES value** 输入栏中输入 34.45e6，如图 9.102 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。加载后的结果如图 9.103 所示。

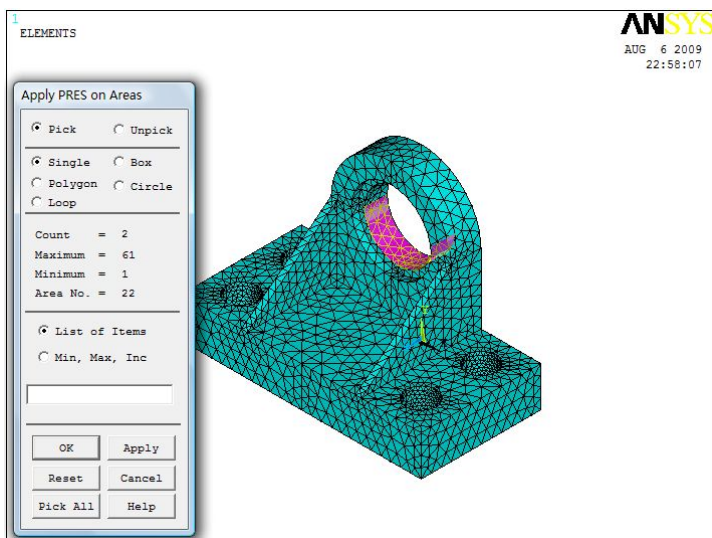


图 9.101 Apply PRES on Areas 拾取菜单及拾取圆柱面操作

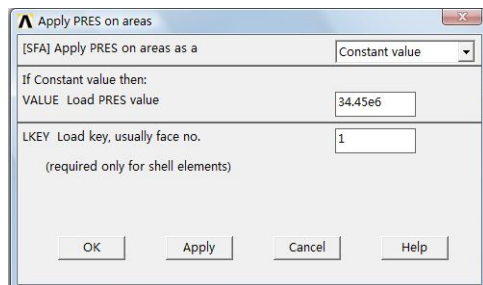


图 9.102 Apply PRES on areas 对话框

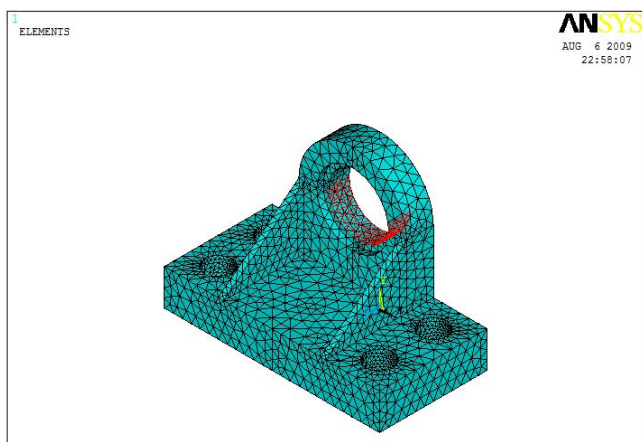


图 9.103 加载后的结果

step 5

求解。选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，[ANTYPE] Type of analysis 栏中选择 Static 单选按钮，如图 9.104 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

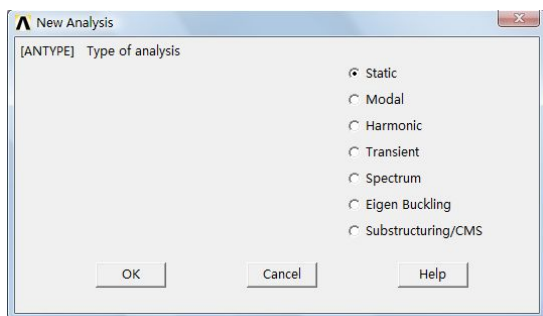


图 9.104 New Analysis 对话框

step 6 选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，如图 9.105 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 程序开始求解计算。

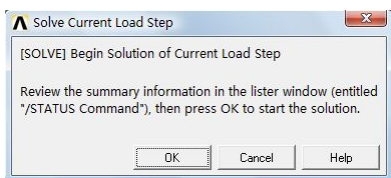


图 9.105 Solve Current Load Step 对话框

step 7 求解结束时，弹出 Note 对话框，如图 9.106 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

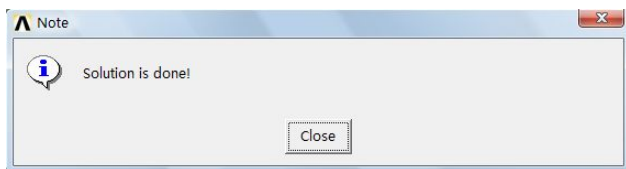


图 9.106 Note 对话框

step 8 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

9.4.2.6 查看求解结果

step 1 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undeformed 单选按钮，如图 9.107 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的轮廓，如图 9.108 所示。

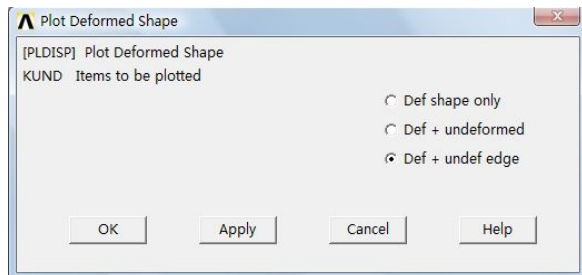


图 9.107 Plot Deformed Shape 对话框

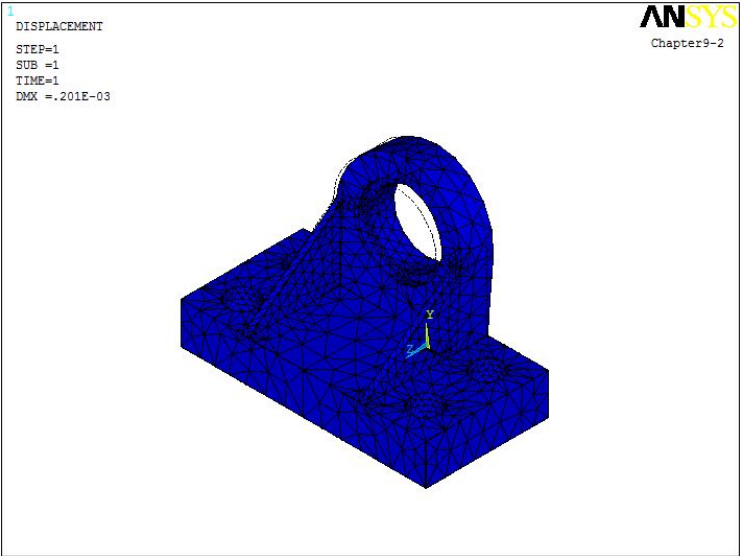


图 9.108 变形后的几何形状和未变形的轮廓

step 2 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，其余选项采用默认设置，如图 9.109 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.110 所示的位移场分布等值线图。

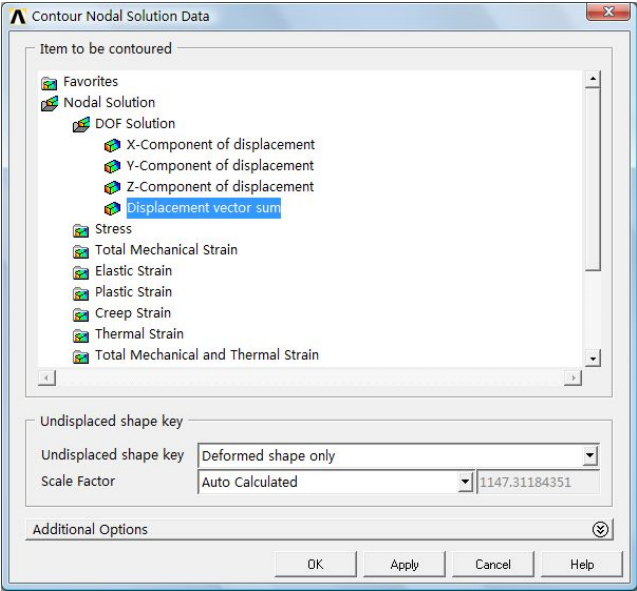


图 9.109 Contour Nodal Solution Data 对话框

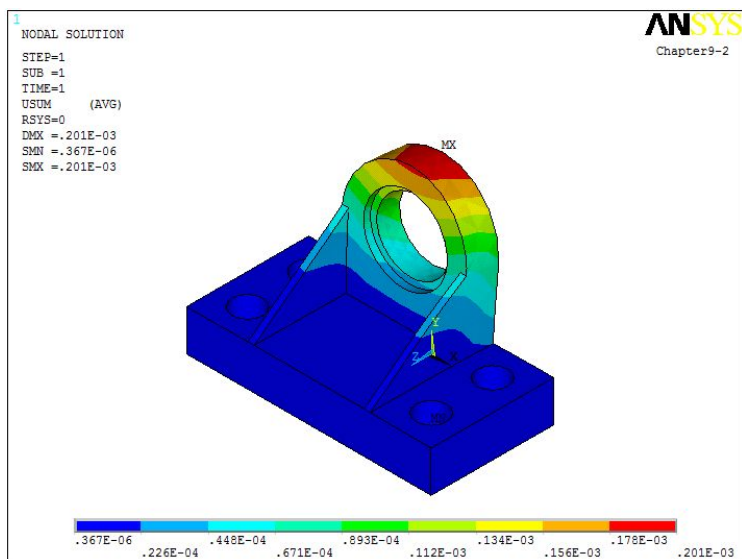


图 9.110 位移场分布等值线图

step 3

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→Stress→von Mises stress 选项，其余选项采用默认设置，如图 9.111 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 9.112 所示的 Mises 等效应力场分布等值线图。

step 4

选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，如图 9.113 所示，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

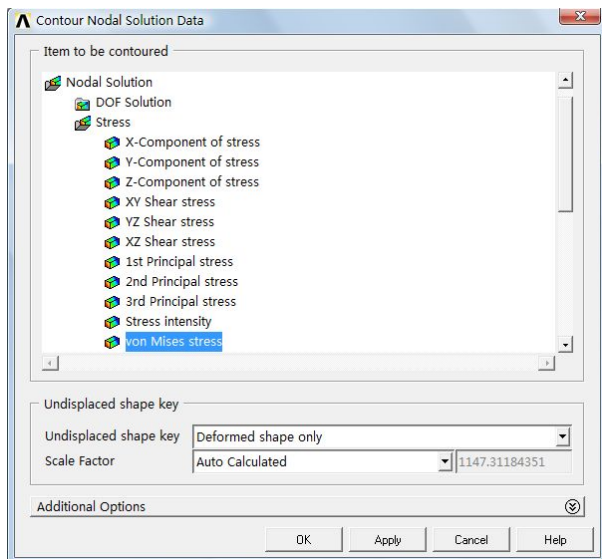


图 9.111 Contour Nodal Solution Data 对话框

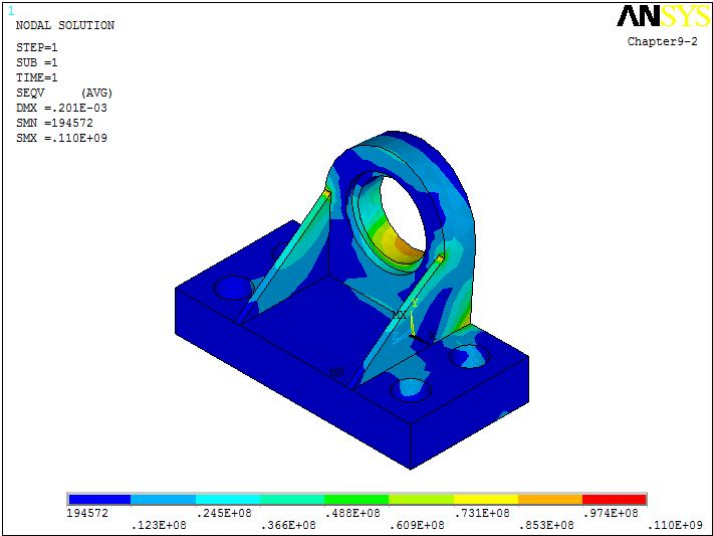


图 9.112 Mises 等效应力场分布等值线图

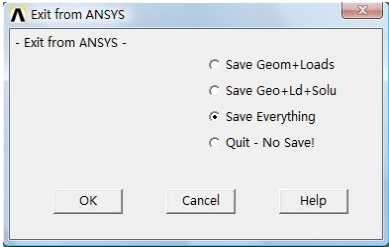


图 9.113 Exit from ANSYS 对话框

9.5 小结

本章首先阐述了实体结构有限元分析的基本过程，接着介绍了 ANSYS 中常用的实体单元的基本特性（其他单元读者可自行查看帮助文件），最后以两个具有代表性的实例详细地描述了三维实体结构的建模、分网、加载、求解及结果查看的方法和步骤，希望能起到抛砖引玉的作用，让读者体会到更复杂的实体结构有限元分析的乐趣与成功感。



Part

第 3 部分 ANSYS 高级分析 实例详解

第 10 章 ANSYS 结构动力学分析

第 11 章 ANSYS 结构非线性分析

第 12 章 ANSYS 结构稳定性分析

3

第 10 章 ANSYS 结构动力学分析

本章包括

- ◆ 结构动力学分析概述
- ◆ 模态分析基本过程及实例详解
- ◆ 谐响应分析基本过程及实例详解
- ◆ 瞬态分析基本过程及实例详解
- ◆ 谱分析基本过程及实例详解

实际结构总是受到随时间变化的载荷的作用，如地震作用、海浪作用、车辆作用、大风作用、碰撞作用等，这时必须进行动力学分析。动力学分析的内容非常广泛，包括模态分析、谐响应分析、瞬态分析、谱分析等，而且其应用非常广泛，航天工程、航空工程、机械工程、土木工程等诸多领域都离不开动力学分析。

本章主要介绍模态分析、谐响应分析、瞬态分析和谱分析 4 种动力学分析的基本原理，并介绍 ANSYS 的基本操作过程，同时结合工程实例，介绍用 ANSYS 分析结构动力学问题的具体方法及详细的分析求解步骤。

10.1 结构动力学分析概述

结构动力分析是区别于静力分析（分析结构在承受稳定载荷作用下的受力特性）来说的，它用来确定结构或构件的动力学特性。数十年以来，随着结构技术的发展，仅作静力分析已经远远不能满足结构安全性的要求，尤其在结构受到随时间变化的载荷时更是如此，如风、地震、流水、爆炸、碰撞等载荷，此时，对结构进行动力学特性分析势在必行。动力学特性通常有下面几种类型。

- ◆ 振动特性，即结构的振动形式和振动频率。
- ◆ 随时间变化载荷的效应（例如：对结构位移和应力的效应）。
- ◆ 周期（振动）或随机载荷的效应。

基于以上几种结构动力学特性，ANSYS 可针对结构进行的动力分析有模态分析、瞬态分析、谐响应分析和谱分析。下面举例说明。

- ◆ 在工作中，不汽车尾气排气管装配体的固有频率与发动机的固有频率相同时，就可能会被震散。那么，怎样才能避免这种结果呢？答案是进行模态分析，以确定结构的振动特性。
- ◆ 跨江大桥的桥墩在江中受到船、冰块의 撞击时，如何保证桥墩的安全呢？答案是进行瞬态分析，以确定结构在受到冲击载荷时的受力特性。

- ◆ 回转机器对轴承和固定结构施加稳态的、交变的作用力，这些作用力随着旋转速度的不同会引起不同的偏转和应力，此时应如何分析呢？答案是进行谐响应分析，以确定结构对稳态简谐载荷的响应。
- ◆ 位于地震多发区的房屋框架和桥梁应该设计为能够承受地震载荷的要求，此时应如何分析呢？答案是进行谱分析，以确定结构在受到动载荷或随机载荷时的受力特性。

10.2 模态分析及实例详解

模态分析用来确定结构或构件的振动特性，即固有频率和振型。在承受动态载荷的结构设计中，它们是很重要的参数。同时，模态分析也是其他动力学分析（如瞬态分析、谐响应分析和谱分析等）前期必须完成的环节。

10.2.1 模态分析理论的基本假设

- ◆ **线性假设**：结构的动态特性是线性的，即任何输入组合所引起的输出等于各自输出的组合，其动力学特性可用一组线性二阶微分方程来描述。需要注意的是，任何非线性特性，如塑性、接触单元等，即使定义了也将被忽略。
- ◆ **时不变性假设**：结构的动态特性不随时间而变化，因此微分方程的系数是与时间无关的常数。
- ◆ **可观测性假设**：即我们所关心的系统动态特性所需要的全部数据都是可测量的。
- ◆ **遵守 Maxwell 互易性定理**：即在结构的 i 点输入所引起的 j 点响应，等于在 j 点的相同输入所引起的 i 点响应。此假设使得结构的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵和频响函数矩阵都成了对称矩阵。

10.2.2 模态分析方法

在 ANSYS 中有以下几种提取模态的方法：**Block Lanczo 法**、**Subspace（子空间）法**、**PCG Lanczos（Power Dynamics）法**、**Reduced（缩减）法**、**Unsymmetric（不对称）法**、**Damped（阻尼）法**、**QR Damped 法**。使用何种模态提取方法主要取决于模型大小（相对于计算机的计算能力而言）和具体的应用场合。

- ◆ **Block Lanczos 法**可以在大多数场合中使用，它是一种功能强大的方法，当需要提取中型到大型模型（50000 ~ 100000 个自由度）的大量振型（ ≥ 40 ）时，这种方法很有效。它经常应用在具有实体单元或壳单元的模型中，在具有或没有初始截断点时同样有效（允许提取高于某个给定频率的振型），还可以很好地处理刚体振型，但需要较高的内存。
- ◆ **子空间法**比较适合于提取中型到大型模型的较少的振型（ < 40 ）。在用于实体单元和壳单元时，应当具有较好的单元形状；在具有刚体振型时可能会出现收敛问题；需要相对较少的内存。建议在具有约束方程时不要使用此方法。
- ◆ **PowerDynamics 法**适用于提取很大的模型（100000 个自由度以上）的较少振型（ < 20 ），这种方法明显比 **Block Lanczos 法**或子空间法快，但是当单元形状不好或出现病态矩阵时，用这种方法可能不收敛；需要很大的内存。建议只将该方法作为针对大模型的一种备用方法。另外需要注意的是，该方法的子空间技术使用 **Power** 求解器（**PCG**）和一直质量矩阵，而且也不执行 **Sturm** 序列检查（对于遗漏模态），对多个重复频率的模型可能会有影响。



当对一个包含刚体模态的模型进行分析时，则必须执行 **RIGID** 命令（或者在分析设置对话框中指定 **RIGID** 设置）。

- ◆ 缩减法适用于模型中的集中质量不会引起局部振动的情况，如梁、杆单元等，它是所有方法中最快的，而且需要较少的内存和硬盘空间。其原理是通过一组主自由度来减小 **[K]** 和 **[M]** 的大小，缩减的刚度矩阵 **[K]** 是精确的，但缩减的质量矩阵 **[M]** 是近似的，近似程度取决于主自由度的数目和位置。在结构抵抗弯曲能力较弱时不推荐使用此方法，如细长的梁和薄壳。
- ◆ 不对称法适用于声学问题（具有结构耦合作用）和其他类似的具有不对称质量矩阵 **[M]** 和刚度矩阵 **[K]** 的问题。这种不对称性往往会使得结构的模态均是复模态，即特征值和特征向量均是复数，此时实数部分就是自然频率，虚数部分表示解的稳定性，负值表示稳定，正值表示不确定。需要注意的是，不对称法采用 **Lanczos** 算法，不执行 **Sturm** 序列检查，所以会遗漏高端频率。
- ◆ 在模态分析中一般忽略阻尼，但如果阻尼的效果比较明显，就要使用阻尼法，该方法主要用于回转体动力学中。在 **ANSYS** 的 **BEAM4** 和 **PIPE16** 单元中，可以通过定义实常数中的 **SPIN**（旋转速度，弧度/秒）选项来说明陀螺效应。该方法同样会引起结构的复模态特性，也存在遗漏高端频率的问题，不同节点的响应可能存在相位差，而响应幅值则等于实部与虚部的矢量和。
- ◆ **QR** 阻尼法适合于分析大阻尼系统，阻尼可以是任意阻尼类型，其计算精度取决于提取的模态数量，所以建议提取足够多的基频模态，但是该方法不建议用于临界阻尼或过阻尼系统。需要注意的是，该方法输出的是复特征值（虚部为频率）和实特征向量。



非对称法、阻尼法和 **QR** 阻尼法在 **ANSYS/Professional** 产品中无效。

10.2.3 模态分析过程

模态分析有 4 个主要步骤，下面分别进行介绍。

1. 建模

主要包括设定文件名和标题，定义单元类型、单元实常数、截面尺寸、材料特性，以及建立几何模型。其中，材料的杨氏模量和密度是必需的，且模型中只能使用线性单元和线性材料，任何非线性因素均被忽略，按照线性因素分析。

2. 定义分析类型和分析选项

主要包括设置分析类型和指定分析选项。

（1）设定分析类型

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Modal**，如图 10.1 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。



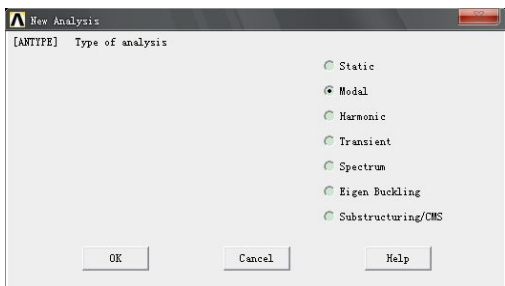


图 10.1 New Analysis 对话框

(2) 指定分析选项

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Analysis Options** 命令，弹出 **Model Analysis** 对话框，如图 10.2 所示。在 **MODOPT** 栏中选择模态分析的方法，在 **No. of modes to extract** 输入栏中填入要分析的模态数目，在 **No. of modes to expand** 输入栏中填入模态扩展数（通常与分析模态数目相同）。在查看徐变等结果时，还需要打开 **Calculate elem results** 选项。在 **[LUMPM]** 栏的复选框中指定质量矩阵形式，默认情况下为一致质量矩阵，如果模态分析方法选择 **PCG Lanczos**，则要用到集中质量矩阵，集中质量矩阵求解时间短，需要的内存少。在 **[PSTRES]** 栏的复选框中设置是否要考虑预应力效应。单击 **OK** 按钮，弹出 **Block Lanczos Method** 对话框，如图 10.3 所示，保持默认设置，单击 **OK** 按钮退出该对话框。

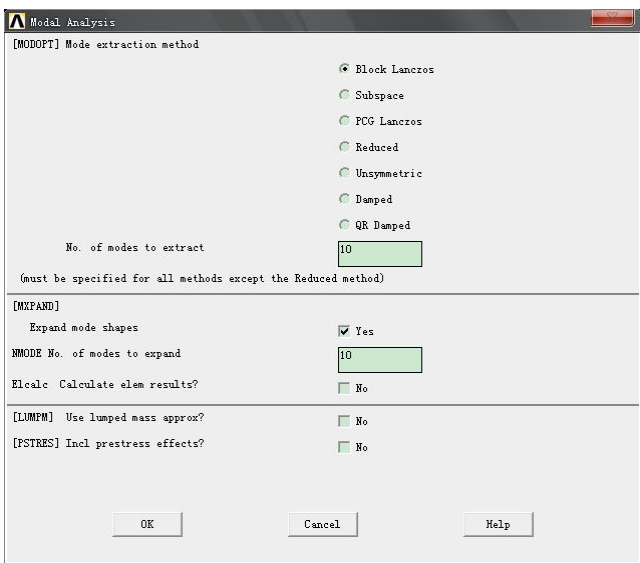


图 10.2 Modal Analysis 对话框

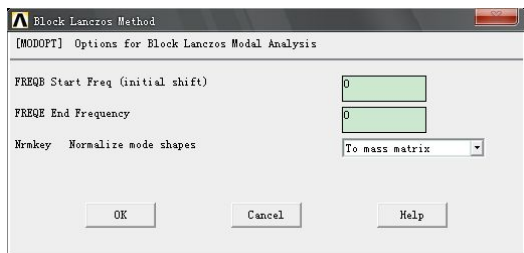


图 10.3 Block Lanczos Method 对话框

在选择缩减法进行模态分析时，主自由度的选择方法应遵循以下原则。

- ◆ 主自由度的总数至少应是感兴趣模态数的两倍。
- ◆ 在结构或构件的振动方向上选择主自由度。
- ◆ 在质量或转动惯量相对较大的位置选择主自由度。
- ◆ 若分析关注的是弯曲模态，则可忽略转动和拉伸的自由度。
- ◆ 在施加力或非零位移约束的位置选择主自由度。
- ◆ 如果要选定的自由度属于一个耦合约束集，则只需选中耦合集中的第一个自由度。
- ◆ 对于轴对称壳模型（SHELL51、SHELL61），选择模型中平行于轴心线部分的所有节点的 UX 自由度为主自由度。对于 $MODE \geq 2$ 的轴对称周期单元，应将其 UX、UZ 自由度都选择为主自由度。

检验主自由度集的选择是否有效的方法有两种，一是用两倍（或一半）数目的主自由度再次进行分析，并对比结果；二是观察输出的缩减质量分布在运动的主要方向上的分量是否达到了结构整个质量的 10%~15%。

3、施加约束条件并求解

主要包括定义载荷、边界条件，指定加载过程设置，以及求解。

（1）定义载荷约束条件

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→ Displacement 命令，可对结点、关键点、线、面等进行约束。

（2）求解

选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令。



在典型的模态分析中，零位移约束是唯一有效的载荷，非零位移约束将被零位移约束代替。若模型中指定了其他载荷，在模态分析时将被忽略。

4、模态扩展分析

模态扩展分析就是将振型写入结果文件。因此，如果想在后处理器中查看振型或要进行谱分析，则必须进行模态扩展分析。

（1）重新进入 ANSYS 求解器

在模态求解结束之后，必须退出求解器并重新进入，才能进行模态扩展分析，对应的命令流为 FINISH, /SOLU。

（2）激活扩展选项

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Expansion Pass 命令，弹出 Expansion Pass 对话框，选中 Expansion Pass 栏中的复选框，如图 10.4 所示，单击 OK 按钮退出该对话框。

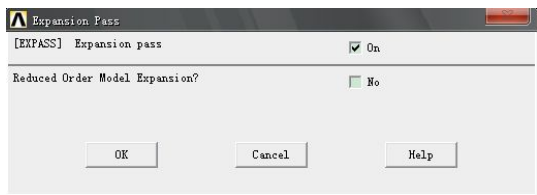


图 10.4 Expansion Pass 对话框

(3) 模态扩展数

选择 Main Menu → Solution → Load Step Opts → Expansion Pass → Single Expand → Expand Modes 命令，弹出 Expand Modes 对话框，如图 10.5 所示。在 No. of modes to expand 设置框中输入要扩展的模态数目，或者在 Frequency range 设置框中指定一个频率范围，则在该频率范围内的模态会被扩展，单击 OK 按钮退出该对话框。

(4) 求解

选择 Main Menu → Solution → Solve → Current LS 命令。

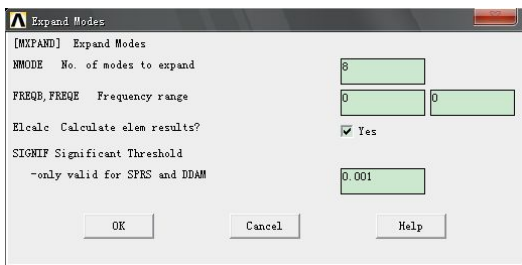


图 10.5 Expand Modes 对话框

5、查看分析结果

模态分析的结果将被写入结构分析结果文件中，主要包括固有频率、已扩展的振型、相对应力和力分布。

(1) 读入合适子步的结果数据

选择 Main Menu → General Postproc → Read Results 命令。

(2) 执行 Post1 后处理操作，查看感兴趣的结果

可执行以下几种操作。

◆ 列出所有已扩展模态对应的频率。

选择 Main Menu → General Postproc → List Results → Results Summary 命令。

◆ 绘出模态形状。

选择 Main Menu → General Postproc → Plot Results → Deformed Shape 命令。

◆ 列出主自由度。

选择 Main Menu → Solution → Master DOFs → List All 命令。

◆ 绘制结果云图。

选择 Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal solu 命令。

选择 Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Element solu 命令。

可显示的项有应力 (SX、SY、SZ)、应变 (EPELX、EPELY、EPELZ) 和位移 (UX、UY、UZ)。

◆ 列出单元表数据和线单元数据的等值线。

选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→Plot Element Table 命令。

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令。

10.2.4 模态分析实例详解：立体桁架结构模态分析

10.2.4.1 问题描述与分析

结构模型采用 6.4 节的立体桁架结构，如图 10.6 所示，每个网格的长宽高均为 0.4m，总长为 3.2m。结构支承方式为一端固定一端悬臂。杆件采用空心钢管，截面尺寸为 $\Phi 16 \times 2.5 \text{mm}^2$ ，弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ，泊松比为 0.3，杆件密度为 7850kg/m^3 。试用 ANSYS 计算该结构的前 6 阶固有频率和振型。

计算结构的固有频率和振型属于模态分析问题，下面先采用 LINK8 单元建立有限元模型，然后对其进行模态分析。

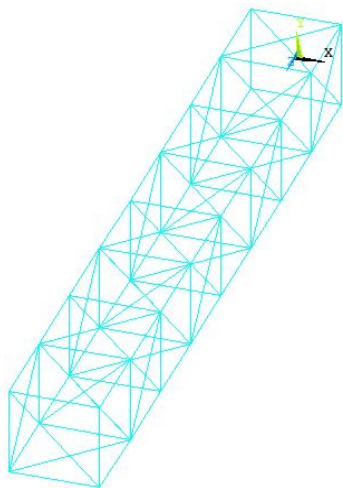


图 10.6 立体桁架结构

10.2.4.2 求解过程

- step 1** 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 10\10-1，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter10-1。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。
- step 2** 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。
- step 3** 选择单元。选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link 中的 3D spar 8 单元，如图 10.7 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

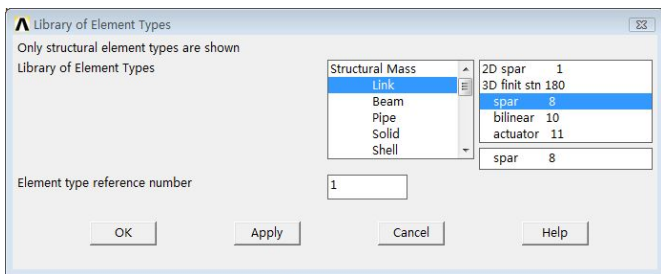


图 10.7 Library of Element Types 对话框

step 4 设置截面属性。选择 **Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete** 命令，弹出 **Real Constants** 对话框，单击 **Add** 按钮，弹出 **Real Constant Set Number 1, for LINK8** 对话框，如图 10.8 所示，在 **Cross-sectional area AERA** 输入栏中输入 0.000106，单击 **OK** 按钮关闭该对话框，单击 **Close** 按钮关闭 **Real Constants** 对话框。

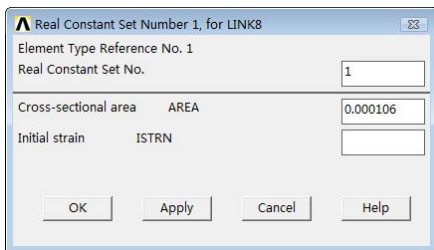


图 10.8 Real Constant Set Number 1, for LINK8 对话框

step 5 设置材料属性。选择 **Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models** 命令，弹出 **Define Material Model Behavior** 对话框，在 **Material Models Available** 栏中依次展开 **Structural→Linear→Elastic→Isotropic** 选项，弹出 **Linear Isotropic Properties for Material Number 1** 对话框，在 **EX** 输入栏中输入 2.1e11，在 **PRXY** 输入栏中输入 0.3，如图 10.9 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。在 **Define Material Model Behavior** 对话框中，在 **Material Models Available** 栏中单击 **Density** 选项，在打开的 **Density for Material Number 1** 对话框中输入 7850，如图 10.10 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。在 **Define Material Model Behavior** 对话框中选择 **Material→Exit** 命令，关闭该对话框。

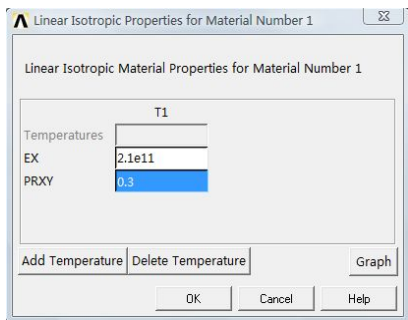


图 10.9 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

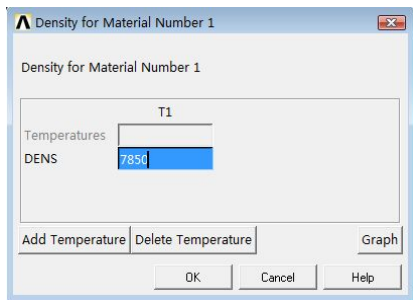


图 10.10 Density for Material Number 1 对话框

Material Number 1 对话框

step 6 创建几何模型的方法此处不再详细阐述，读者可参考第 6 章 6.4.2.3 小节的具体操作过程，创建的模型如图 10.11 所示。

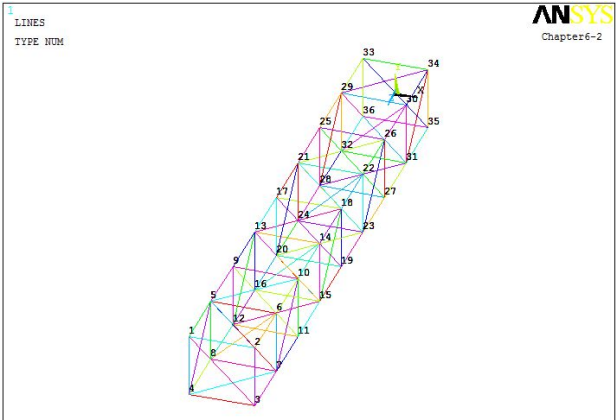


图 10.11 创建的几何模型

step 7 划分网格的方法此处也不再详细阐述，读者可参考第 6 章 6.4.2.4 小节的具体操作过程，划分网格后的结果如图 10.12 所示。

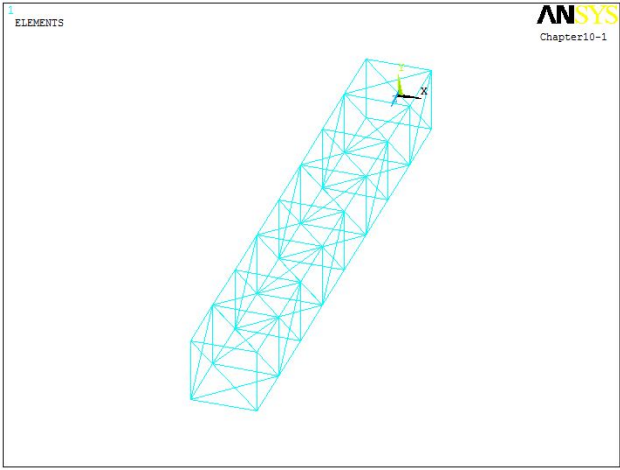


图 10.12 划分网格后的结果

step 8 施加位移约束的方法此处也不再详细阐述，读者可参考第 6 章 6.4.2.5 小节的具体操作过程，施加位移约束后的结果如图 10.13 所示。

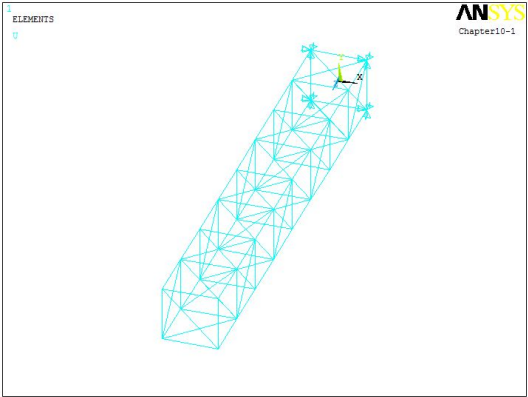


图 10.13 施加位移约束后的结果



step 9

设置分析类型及分析选项。选择 **Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Modal**，如图 10.14 所示，单击 **OK** 按钮确认。选择 **Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options** 对话框，弹出 **Modal Analysis** 对话框，模态提取方法采用 **Block Lanczos**，提取模态数设为 6，扩展模态数也设为 6，如图 10.15 所示。单击 **OK** 按钮，弹出 **Block Lanczos Method** 对话框，在 **FREQB Start Freq (initial shift)** 输入栏中输入 0，在 **FREQE End Frequency** 输入栏中输入 1000000，在 **Nrmkey Normalize mode shapes** 下拉列表框中选择 **To mass matrix** 选项，如图 10.16 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

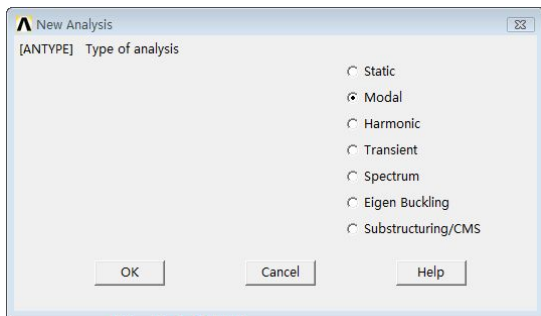


图 10.14 New Analysis 对话框

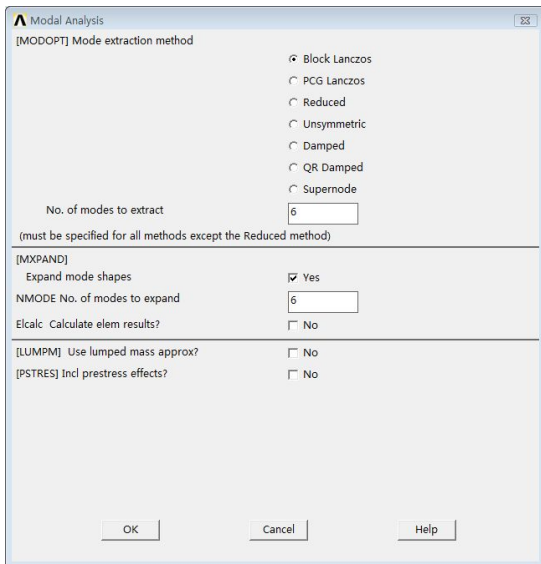


图 10.15 模态分析选项设置

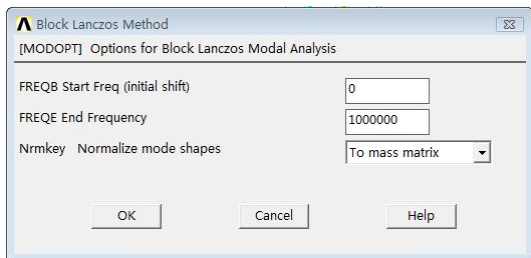


图 10.16 Block Lanczos Method 对话框



与静力分析不同，该操作选择求解类型为模态分析。在进行模态分析选项的设置时，也可以尝试选择其他模态分析方法来计算该工程实例。在 Block Lanczos Method 对话框中进行设置时，本例在 FREQE End Frequency 输入栏中输入了 1000000，需要说明的是，这个数值不是固定的，只要充分大即可。

step 10

扩展模态设置。选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Expansion Pass→Single Expand→Expand Modes 命令，弹出 Expand Modes 对话框，模态扩展数设为 6，在 FREQB, FREQE Frequency range 输入栏中分别输入 0 和 1000000，如图 10.17 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

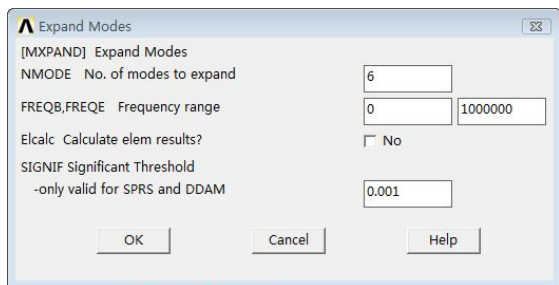


图 10.17 Expand Modes 对话框

step 11

模态分析求解。选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始计算模态解，求解结束后弹出 Note 对话框，提示 Solution is done!，单击 Close 按钮关闭该对话框。

step 12

观察固有频率结果。进入通用后处理器 POST1，选择 Main Menu→General Postproc→Results Summary 命令，弹出 SET,LIST Command 列表框，如图 10.18 所示，从该列表框中可以观察该结构前 6 阶固有频率结果。

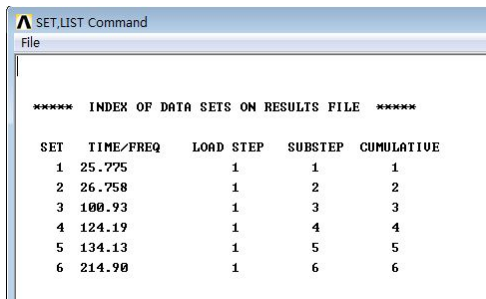


图 10.18 固有频率计算结果



此处固有频率的单位为 Hz。

step 13

读入结果数据，观察振型结果。选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→First Set 命令，读入第 1 载荷子步计算结果。然后选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选中 Def+undeformed 复选框，单击 OK 按钮，显示结构的第 1 阶模态振型，如图 10.19 所示。

重复上述操作，读入结果数据时选择 **Next Set** 或 **Previous Set** 命令，可以得到其他 5 阶振型。

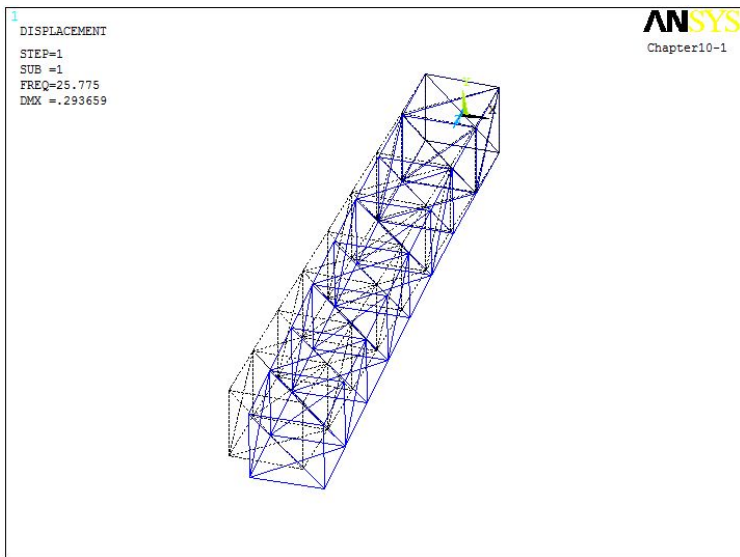


图 10.19 第 1 阶模态振型

step 14

观察振型等值线结果。首先也像上步一样读入结果数据，然后选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solu** 命令，弹出 **Contour Nodal Solution Data** 对话框。在 **Item to be contoured** 栏中依次展开 **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Displacement vector sum** 选项，在 **Undisplaced shape key** 下拉列表框中选择 **Deformed shape with undeformed model** 选项，如图 10.20 所示，单击 **OK** 按钮，显示结构的第 1 阶模态振型等值线结果。重复上述操作，可以得到其他 5 阶振型的等值线结果，如图 10.21 所示。

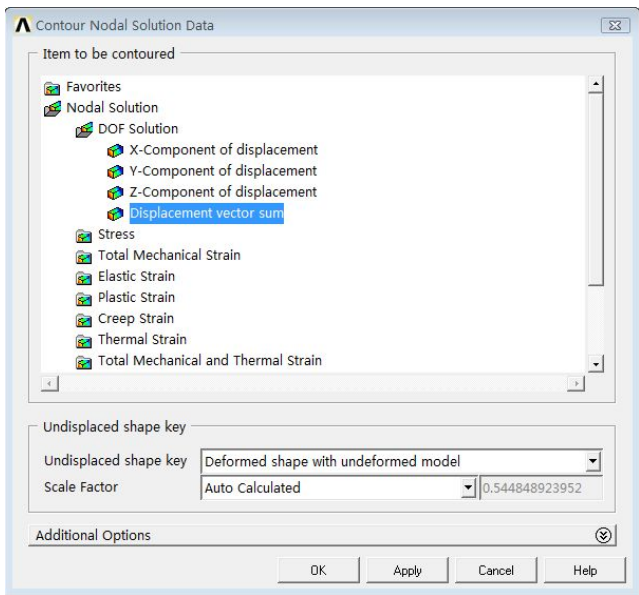
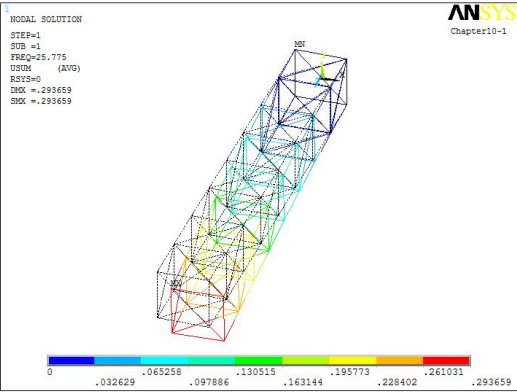
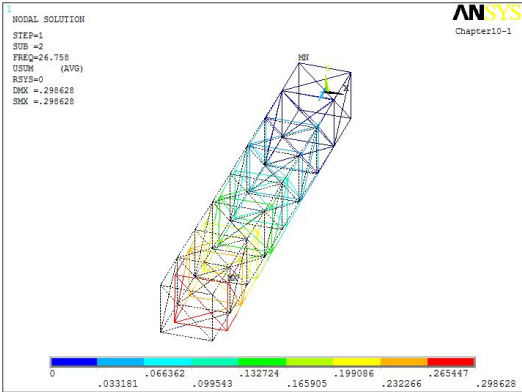




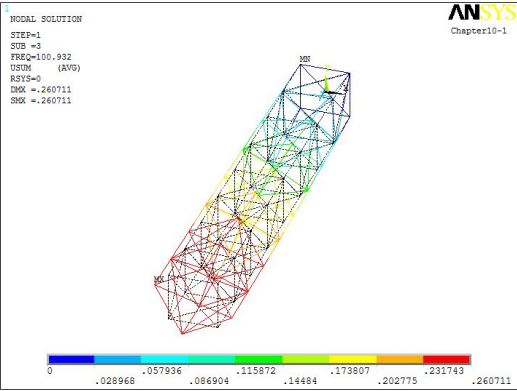
图 10.20 Contour Nodal Solution Data 对话框



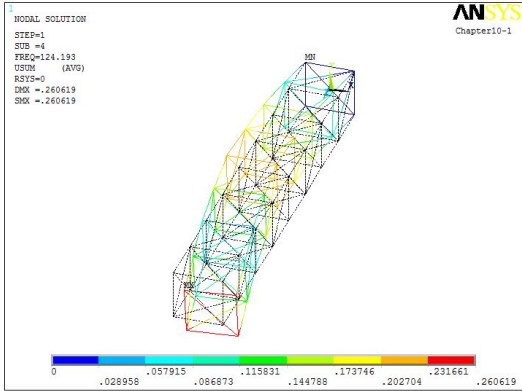
a) 第 1 阶振型



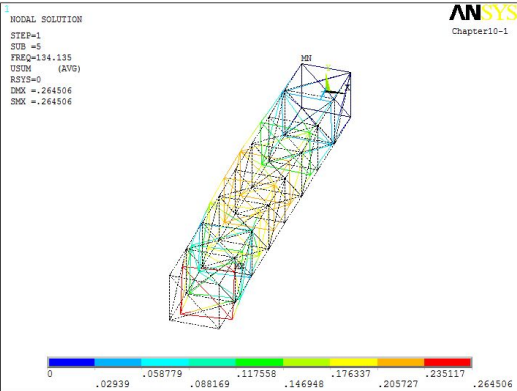
b) 第 2 阶振型



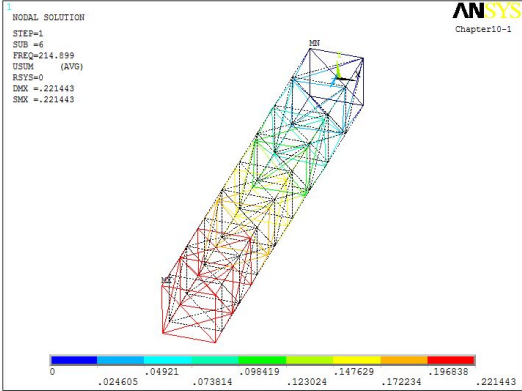
c) 第 3 阶振型



d) 第 4 阶振型



e) 第 5 阶振型



f) 第 6 阶振型

图 10.21 结构的前 6 阶振型等值线结果显示



这里显示的位移值大小只是相对值，没有实际意义。

step 15

选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。



10.2.4.3 命令流

```

/prep7 !进入前处理

! 定义关键点
*do, i, 1, 33, 4
k, i, -0.4/2, 0.4/2, 8*0.4-(i-1)/4*0.4
k, i+1, 0.4/2, 0.4/2, 8*0.4-(i-1)/4*0.4
k, i+2, 0.4/2, -0.4/2, 8*0.4-(i-1)/4*0.4
k, i+3, -0.4/2, -0.4/2, 8*0.4-(i-1)/4*0.4
*enddo
! 定义关键点

! 连线
L, 1, 2
L, 2, 3
L, 3, 4
L, 4, 1
L, 1, 3
L, 1, 5
L, 2, 6
L, 3, 7
L, 4, 8
L, 2, 5
L, 2, 7
L, 4, 7
L, 4, 5
L, 5, 6
L, 6, 7
L, 7, 8
L, 8, 5
L, 8, 6
L, 5, 9
L, 6, 10
L, 7, 11
L, 8, 12
L, 5, 10
L, 7, 10
L, 7, 12
L, 5, 12
L, 9, 10
L, 10, 11
L, 11, 12
L, 12, 9
L, 9, 11
L, 9, 13

```



L,	10,	14
L,	11,	15
L,	12,	16
L,	10,	13
L,	10,	15
L,	15,	12
L,	12,	13
L,	13,	14
L,	14,	15
L,	15,	16
L,	13,	16
L,	16,	14
L,	13,	17
L,	14,	18
L,	15,	19
L,	16,	20
L,	13,	18
L,	18,	15
L,	15,	20
L,	13,	20
L,	17,	18
L,	18,	19
L,	19,	20
L,	20,	17
L,	17,	19
L,	17,	21
L,	18,	22
L,	19,	23
L,	20,	24
L,	18,	21
L,	18,	23
L,	23,	20
L,	20,	21
L,	21,	22
L,	22,	23
L,	23,	24
L,	21,	24
L,	24,	22
L,	21,	25
L,	22,	26
L,	23,	27
L,	24,	28
L,	21,	26
L,	26,	23
L,	23,	28
L,	21,	28
L,	25,	26
L,	26,	27
L,	27,	28
L,	25,	28
L,	25,	27



```

L, 25, 29
L, 26, 30
L, 27, 31
L, 28, 32
L, 26, 29
L, 26, 31
L, 31, 28
L, 29, 28
L, 29, 30
L, 30, 31
L, 31, 32
L, 29, 32
L, 32, 30
L, 29, 33
L, 30, 34
L, 31, 35
L, 32, 36
L, 29, 34
L, 34, 31
L, 31, 36
L, 29, 36
L, 33, 34
L, 34, 35
L, 35, 36
L, 33, 36
L, 35, 33
! 连线

```

```

! 定义单元类型, 材料属性
ET,1,LINK8

```

```

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPDATA,DENS,1,,7850

```

```

R,1,0.000106,,
! 定义单元类型, 材料属性

```

```

! 划分单元
LESIZE,ALL,,1,,1,,1,

```

```

LSEL,all,, , , , ,

```

```

LMESH,all, ,
! 划分单元

```



```
! 加载求解
FINISH
/SOL

DK,33,all, , , , , ,
DK,34,all, , , , , ,
DK,35,all, , , , , ,
DK,36,all, , , , , ,

! 施加约束

ANTYPE,2
! 模态分析类型

MODOPT,LANB,6
EQSLV,SPAR
MXPAND,6, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0

MODOPT,LANB,6,0,1000000, ,OFF
MXPAND,6,0,1000000,0,0.001,
! 扩展模态

SOLVE
FINISH
! 加载求解

! 结果查看
/POST1

SET,LIST
! 观察固有频率结果

SET,FIRST
! 观察前 6 阶振型结果
PLDISP,1
SET,NEXT
PLDISP,1
SET,NEXT
PLDISP,1
SET,NEXT
PLDISP,1
SET,NEXT
PLDISP,1
SET,NEXT
PLDISP,1
SET,NEXT
PLDISP,1
SET,NEXT
PLDISP,1

SET,FIRST
! 观察前 6 阶振型等值线结果
PLNSOL, U,SUM, 1,1.0
SET,NEXT
PLNSOL, U,SUM, 1,1.0
SET,NEXT
PLNSOL, U,SUM, 1,1.0
SET,NEXT
```



```
PLNSOL, U, SUM, 1, 1.0
SET, NEXT
PLNSOL, U, SUM, 1, 1.0
SET, NEXT
PLNSOL, U, SUM, 1, 1.0
```

! 结果查看

```
FINISH
! /EXIT, ALL
```

10.3 谐响应分析及实例详解

本节介绍谐响应分析的基本原理和工程实例应用。

10.3.1 谐响应分析的定义及应用

谐响应分析是用于确定一个线性结构在已知频率的正弦（简谐）载荷作用下的结构稳态响应的技术。该技术只计算结构的稳态受迫振动，不考虑结构在激励开始时的瞬态振动。谐响应分析使设计人员能预测结构的持续动力特性，从而能够验证其设计是否能够克服疲劳共振及其他受迫振动引起的有害影响。

输入：已知大小和频率的谐波载荷（力、压力和强迫位移）；同一频率的多种载荷，可以是同相或不同相的。

输出：每一个自由度上的谐响应（如位移、应力和应变等），通常和施加的载荷不同相。

已知动力学运动方程：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (10-1)$$

其中， $[M]$ 为质量矩阵， $[C]$ 为阻尼矩阵， $[K]$ 为刚度矩阵， $\{u\}$ 为节点位移向量， $\{F(t)\}$ 载荷可为时间的任意函数。对简谐运动而言， $\{u\}$ 和 $\{F\}$ 均为简谐形式，设其频率为 ω ，则有：

$$\begin{aligned} \{F\} &= \{F_{\max} e^{i\psi}\} e^{i\omega t} = (\{F_1\} + i\{F_2\}) e^{i\omega t} \\ \{u\} &= \{u_{\max} e^{i\psi}\} e^{i\omega t} = (\{u_1\} + i\{u_2\}) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (10-2)$$

将其代入运动方程(10-1)，可得到谐响应分析的运动方程：

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K])(\{u_1\} + i\{u_2\}) = (\{F_1\} + i\{F_2\}) \quad (10-3)$$

由此可见，当所施加载荷的虚部非零时，谐响应分析得到的响应解均是复数形式。谐响应分析可以应用在以下工程分析中。

- ◆ 旋转设备（如压缩机、发动机、泵、涡轮机械等）的支座、固定装置和部件。
- ◆ 受涡流（流体的漩涡运动）影响的结构，如涡轮叶片、飞机机翼、桥和塔等。



谐响应分析是一种线性分析，非线性特性被忽略。

10.3.2 谐响应分析方法

谐响应分析可采用 3 种方法：完全（Full）法、缩减（Reduced）法及模态叠加（Mode Superposition）法。ANSYS/Linear Plus 产品中只允许用模态叠加法。在研究如何实现这些方法之前，先来探讨一下各种方法的优点和缺点。

10.3.2.1 完全法

完全法采用完整的系统矩阵来计算瞬态响应（没有矩阵缩减），是 3 种方法中功能最强的，也是默认的方法。其优点如下。

- ◆ 容易使用，不必关心主自由度或振型的选择。
- ◆ 采用完整矩阵，不涉及质量矩阵近似。
- ◆ 允许非对称矩阵，在声学或轴承问题中经常涉及到。
- ◆ 通过一次分析就能得到所有的位移和应力。
- ◆ 允许施加所有类型的载荷：节点力、外加的（非零）位移（不建议采用）和单元载荷（压力和温度）。
- ◆ 允许在实体模型上施加载荷。

完全法的缺点如下。

- ◆ 预应力选项不可用。
- ◆ 采用 Frontal 方程求解器时开销大，但采用 JCG 或 ICCG 求解器时，完全法的效率很高。

10.3.2.2 缩减法

缩减法通过采用主自由度及缩减矩阵压缩问题规模，来进行问题求解。主自由度处的位移被计算出来后，ANSYS 可将解扩展到原有的完整自由度集上。其优点如下。

- ◆ 比完全法求解速度快且开销小。
- ◆ 可以考虑预应力选项。

缩减法的缺点如下。

- ◆ 初始解只计算主自由度的位移，第二步进行扩展计算，得到完整空间上的位移、应力和力。
- ◆ 不能施加单元载荷（如压力，温度等），但允许施加加速度。
- ◆ 所有载荷必须加在用户定义的主自由度上（限制在实体模型上施加载荷）。

10.3.2.3 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到振型（特征值），再乘上系数并求和，来计算结构的响应。其优点如下。

- ◆ 是所有方法中速度最快、开销最小的。

- ◆ 只要模态分析不采用 **Power Dynamics** 方法，即可通过 **LVSCALE** 命令将模态分析中施加的单元载荷引入到瞬态分析中。
- ◆ 可以使解按结构的固有频率聚集，可得到更平滑、更精确的响应曲线图。
- ◆ 允许考虑模态阻尼（阻尼比作为振型号的函数）。
- ◆ 可以考虑预应力选项。

模态叠加法的缺点如下。

- ◆ 不能施加非零位移。
- ◆ 模态分析采用 **Power Dynamics** 方法时，初始条件中不能有预加载荷。

10.3.2.4 3 种方法的局限性和对比

3 种方法共同的局限性如下。

- ◆ 所有载荷必须随时间按照正弦规律变化，且具有相同的频率。
- ◆ 不允许有非线性特性。
- ◆ 不计算瞬态效应。

3 种方法的对比如表 10.1 所示。

表 10.1 谐响应 3 种方法的对比

对比项	完全法	缩减法	模态叠加法
相对求解时间	慢	较快	最快
相对使用容易程度	最容易	较容易	难
是否允许元素载荷（如压强）	允许	不允许	允许（一个载荷向量）
是否允许非零位移载荷	允许	允许	不允许
是否允许模态阻尼	不允许	不允许	允许
是否能处理预应力	不能	能	能
是否能进行“Restart”	能	能	不能
是否允许非对称矩阵	允许	不允许	不允许
是否需要选择模态来进行求解	不需要	不需要	需要
是否需要选择主自由度	不需要	需要	需要（如果选用缩减法）

10.3.3 谐响应分析步骤

谐响应分析主要分为 3 个步骤，下面详细介绍。

1、创建模型

建模过程与静力分析基本相同，如指定文件名和分析标题，定义单元类型、单元实常数、材料性质及几何模型等。

2、加载并求解

主要完成选项设置、施加载荷、设置载荷步选项并求解等内容。



（1）分析选项设置

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Harmonic**，单击 **OK** 按钮确认。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Analysis Options** 对话框，在弹出的 **Harmonic Analysis** 对话框的 **Solution Method** 下拉列表框中选择求解方法，如图 10.22 所示，单击 **OK** 按钮。

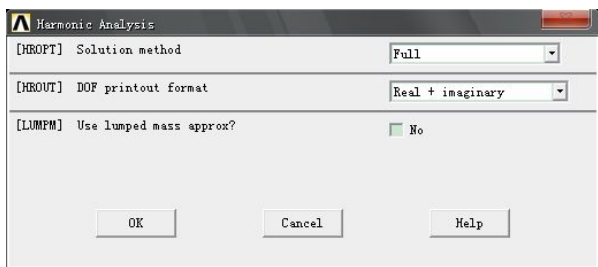


图 10.22 Harmonic Analysis 对话框

该对话框中的其他选项含义如下。

- ◆ **[HROUT]选项**：指定解的输出形式。
- ◆ **[LUMPM]选项**：指定质量矩阵的形式，除了某些薄膜结构的问题（如细长梁或非常薄的壳）需要采用集中质量矩阵，大多数情况下采用默认设置的分布质量矩阵即可。

（2）施加载荷

谐响应分析的载荷中包含 3 条信息：**Amplitude**（幅值，载荷的最大值）、**Phase Angle**（相位角，载荷滞后或领先于参考时间的量度）和 **Forcing Frequency Range**（强制频率范围，简谐载荷的频率范围，单位为周/单位时间）。



谐响应分析不能计算频率不同的多个强制载荷同时作用时的响应，但在 POST1 中可以对两种载荷状况进行叠加，以得到总体响应。

在谐响应分析中，载荷可以施加在实体模型上（如关键点、线、面、体），也可以施加在有限元模型上（如结点、单元），可以施加的载荷有位移、集中力、力矩、面载荷、体积载荷、温度效应及惯性载荷（如重力）。

（3）指定载荷步选项

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Time/Frequency**→**Freq and Substeps** 命令，弹出 **Harmonic Frequency and Substep Options** 对话框，如图 10.23 所示。

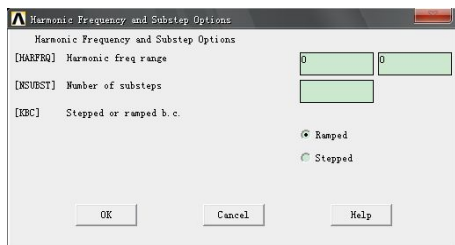


图 10.23 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框



该对话框中的各选项含义如下。

- ◆ [HARFRQ]选项：指定求解的频率范围。
- ◆ [NSUBST]选项：设定求解的载荷子步数，均匀分布在指定的频率范围内。
- ◆ [KBC]选项：设定载荷的变化方式。**Ramped** 单选按钮是指载荷的幅值随载荷子步逐渐增长，**Stepped** 载荷在频率范围内的每个载荷子步中保持不变。



在进行谐响应分析时，完全法和缩减法如果不指定阻尼，则默认阻尼为 0。

(4) 求解

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**Current LS** 命令，进行谐响应求解。

3、查看分析结果

(1) 通用后处理器 POST1

POST1 用于指定频率点处整个模型的结果，与静力分析及模态分析的结果查看相似。

(2) 时间历程后处理器 POST26

POST26 用于指定点在整个频率范围内的结果。可以绘制变量对频率或其他变量的关系曲线，也可以列表查看各个变量值。

操作过程中执行的命令为：

Main Menu→**TimeHist Postpro**→**Graph Variable**

Main Menu→**TimeHist Postpro**→**Setting**→**Graph**

Main Menu→**TimeHist Postpro**→**List Variables/List Extremes**

Main Menu→**TimeHist Postpro**→**Setting**→**List**

10.3.4 谐响应分析实例详解：两自由度系统谐响应分析

10.3.4.1 问题描述与分析

两自由度系统是结构动力学理论的经典模型，在诸多动力学教材中被采纳为讲解多自由度系统特性的例题，实际工程中也不乏可以抽象出两自由度模型的工程实例。因此，作为谐响应分析实例，对如图 10.24 所示的两自由度结构模型，在节点球上作用简谐激励载荷 $F=20\text{N}$ ，频率范围 $0\sim 50\text{Hz}$ ，计算此系统的响应。

材料属性如下：弹性模量为 $2.1\times 10^{11}\text{N/m}^2$ ，密度为 7850kg/m^3 ，泊松比为 0.3。梁截面为方钢管，尺寸为 $80\times 40\times 4$ ，球为空心球，尺寸为 $\Phi 200\times 6$ ，重量为 3.79kg ，结构尺寸如图 10.24 所示，单位为 mm。

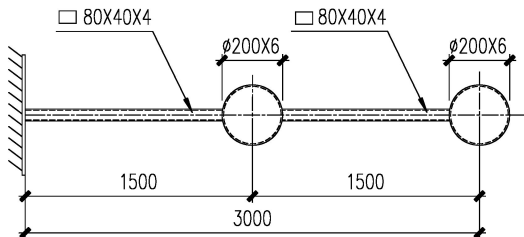


图 10.24 两自由度结构模型

本实例中的梁单元采用二维平面梁单元 **BEAM3** 单元，空心球简化成集中质量，用 **MASS21** 单元来模拟，下面讲解具体求解过程。

10.3.4.2 求解过程

- step 1** 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 10\10-2，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter10-2。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。
- step 2** 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。
- step 3** 选择单元类型。选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框。单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 中的 2D Elastic 3 单元。同理选择 MASS21 单元模拟质量球节点，单击 OK 按钮关闭该对话框。然后选中 Element Types 对话框中的 MASS21 单元，单击该对话框中的 Options 按钮，弹出 MASS21 element type options 对话框。在 Rotary inertia options K3 下拉列表框中选择 2-D w/o rot iner 选项，如图 10.25 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

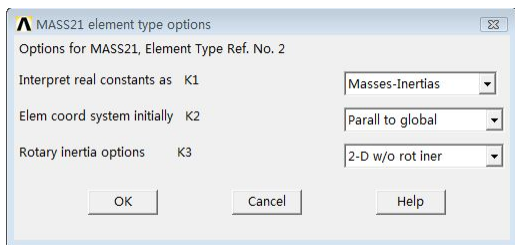


图 10.25 MASS21 element type options 对话框

- step 4** 设置实常数。选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，选择 MASS21 单元，单击 OK 按钮，弹出 Real Constant Set Number 1, for MASS21 对话框，定义质量单元的质量为 3.79kg，如图 10.26 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。再次单击 Add 按钮，选择 BEAM3 单元，单击 OK 按钮，弹出 Real Constants for BEAM3 对话框，设置的参数如图 10.27 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Real Constants 对话框。

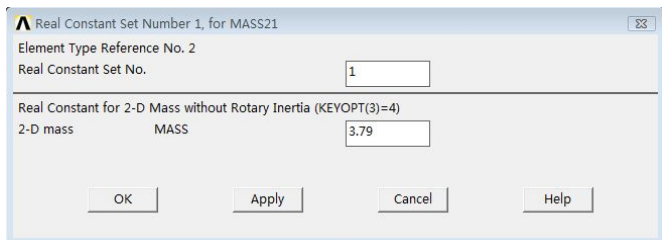


图 10.26 Real Constant Set Number 1, for MASS21 对话框

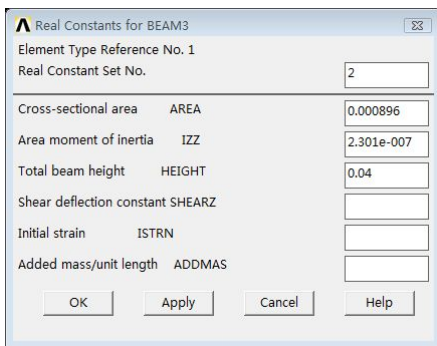


图 10.27 Real Constants for BEAM3 对话框

step 5

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 $2.1\text{e}11$ ，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 10.28 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Density 选项，在 Density for Material Number 1 对话框中输入 7850，如图 10.29 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭 Define Material Model Behavior 对话框。

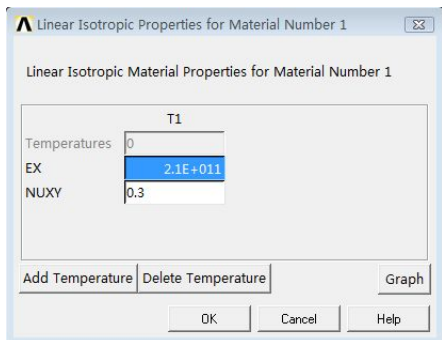


图 10.28 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

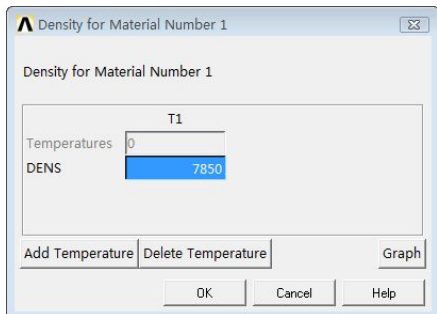


图 10.29 Density for Material Number 1 对话框

step 6

创建关键点。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 X,Y,Z Location in active CS 栏中依次输入 1 号、2 号和 3 号关键点的坐标值：0、0、0；1.5、0、0；3、

0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框，生成关键点后的结果如图 10.30 所示。



图 10.30 生成关键点后的结果

step 7

创建线。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line 命令，弹出 Create Straight Line 对话框，依次选择 1 号、2 号和 2 号、3 号关键点创建线，单击 OK 按钮关闭该对话框，生成线后的结果如图 10.31 所示。

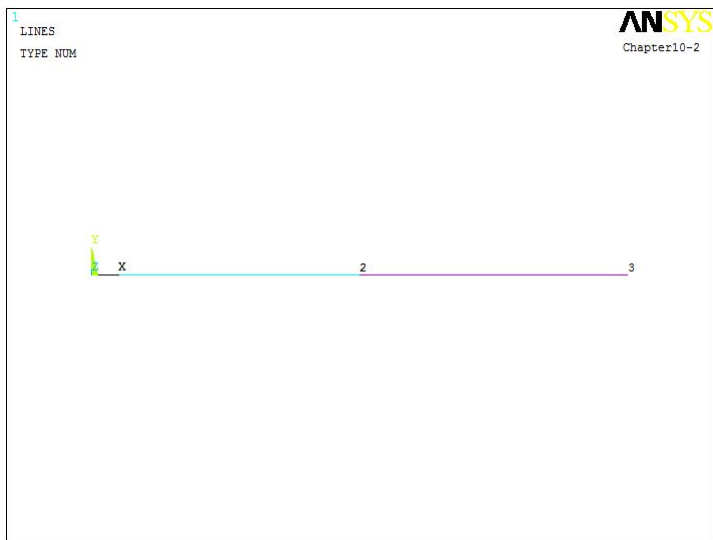


图 10.31 生成线后的结果

step 8

对线划分网格。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Default Attribs 命令，在弹出的对话框的[TYPE] Element type number 下拉列表框中选择 1 BEAM3 选项，其余设置如图 10.32 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→ Lines→Picked Lines 命令，弹出 Element Size on Picked Lines 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口中选择两条线，单击 Apply 按钮，弹出 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 No. of element divisions 栏中输入 5，如图 10.33 所示，

单击 **OK** 按钮退出该对话框。选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines** 命令，弹出 **Mesh Lines** 拾取框，单击 **Pick All** 按钮，对线进行网格划分。

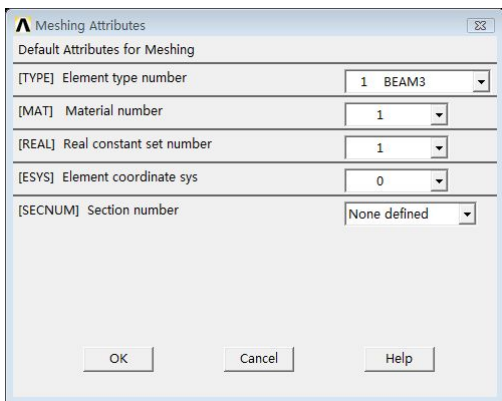


图 10.32 Meshing Attributes 对话框

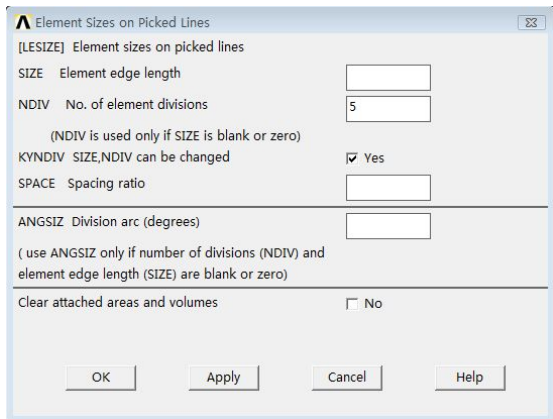


图 10.33 Element Sizes on Picked Lines 对话框



由于该结构总共就两条直线，而且两条直线的网格划分属性相同，故也可以选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All Lines** 命令来进行网格尺寸划分。

step 9

对关键点划分网格。选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Default Attribs** 命令，在弹出的对话框的 **[TYPE] Element type number** 下拉列表框中选择 **2 MASS21** 选项，其余设置如图 10.34 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Keypoints** 命令，弹出 **Mesh Keypoints** 拾取框，用鼠标单击关键点 2 和关键点 3，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。划分网格后的结果如图 10.35 所示。

step 10

施加位移约束。选择 **Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints** 命令，弹出 **Apply U,ROT on Keypoints** 拾取菜单，用鼠标拾取关键点 1，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Apply U,ROT on Keypoints** 对话框，在 **Lab2 DOFs to be constrained** 列表框中选择 **ALL DOF** 选项，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

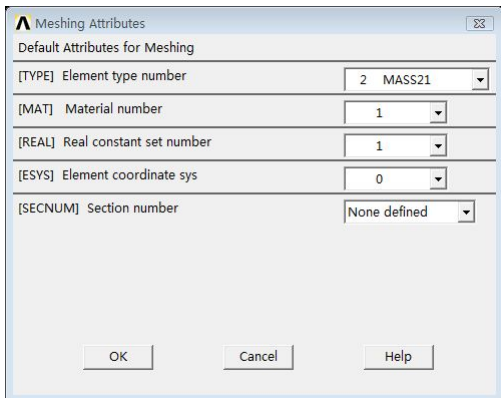


图 10.34 Meshing Attributes 对话框

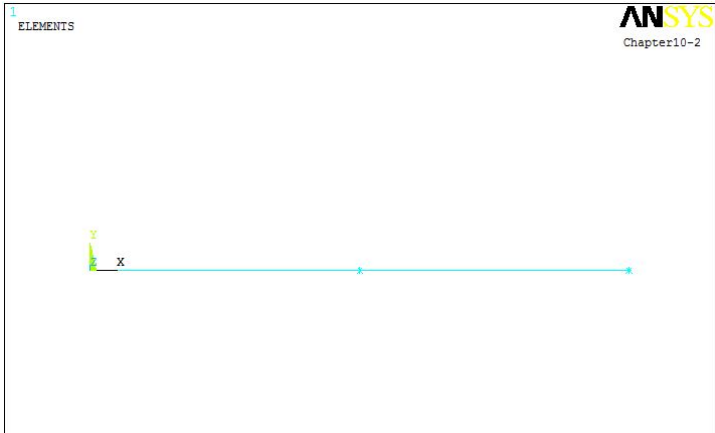


图 10.35 划分网格后的结果

step 11 设置分析类型。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Harmonic**，单击 **OK** 按钮确认。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Analysis Options** 命令，弹出 **Harmonic Analysis** 对话框，在 **Solution method** 列表框中选择 **Full** 方法，如图 10.36 所示，单击 **OK** 按钮，弹出 **Full Harmonic Analysis** 对话框，保持默认设置，单击 **OK** 按钮退出。

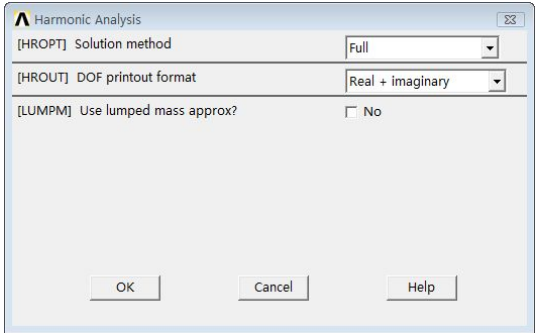


图 10.36 Harmonic Analysis 对话框

step 12 施加载荷。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Force/Moment**→**on Nodes** 命令，弹出 **Apply F/M on Nodes** 对话框，在图形界面上选择节点 7 (悬臂端节点球处)，单击 **OK** 按钮，弹出 **Apply F/M on Nodes** 对话框 在 **Direction of force/mom** 下拉列表框中选择 **FY** 选项，在 **Real part of force/mom** 输入栏中输入 20，在 **Imag part of force/mom** 输入栏中输入 0，如图 10.37 所示，单击 **OK** 按钮退出。

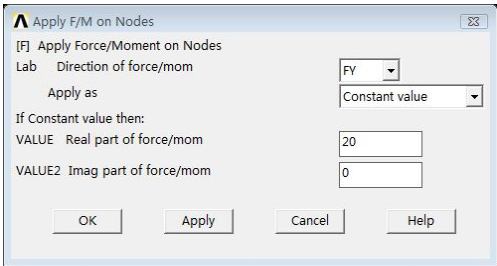


图 10.37 Apply F/M on Nodes 对话框

step 13

设置频率范围和载荷步。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Time/Frequency**→**Freq and Substeps** 命令，弹出 **Harmonic Frequency and Substep Options** 对话框，设置 **Harmonic freq range** 范围为 0~50Hz，载荷子步数 **Number of substeps** 取 50，载荷形式选择 **Ramped**，如图 10.38 所示，单击 **OK** 按钮退出。

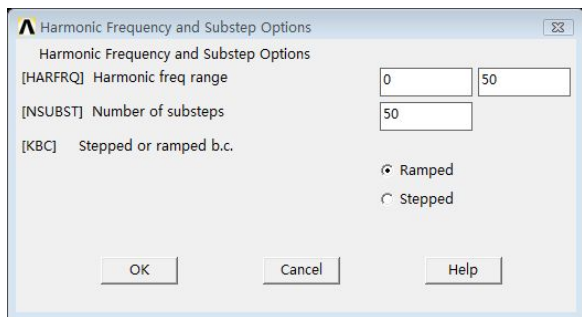




图 10.38 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框

step 14

求解。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**Current LS** 命令，弹出 **Solve Current Load Step** 对话框，单击 **OK** 按钮开始计算谐响应解，求解结束后弹出 **Note** 对话框，提示 **Solution is done!**，单击 **Close** 按钮关闭该对话框。

step 15

查看结果。进入 **POST26** 后处理器，选择 **Main Menu**→**TimeHist Postpro** 命令，在弹出的 **Time History Variables** 对话框中单击 **Add Data** 按钮，弹出 **Add Time-History Variable** 对话框，依次展开 **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Y-Component of displacement** 选项，变量名取为 **UY_2**，单击 **OK** 按钮，弹出 **Node for Data** 拾取框，拾取模型节点 2（中间节点球处），单击 **OK** 按钮退出。重复上述操作，将节点 7 的 Y 方向位移定义为 **UY_3**。在 **Time History Variables** 对话框的变量列表中选择变量 **UY_2** 和 **UY_3**，如图 10.39 所示，单击 **Graph Data** 按钮，ANSYS 显示窗口将显示两个变量随频率变化的曲线，如图 10.40 所示。

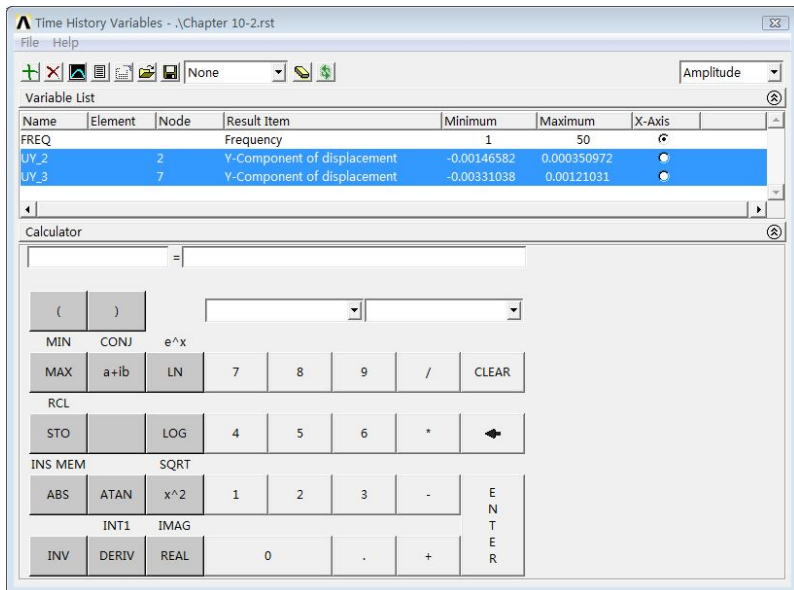




图 10.39 Time History Variables 对话框

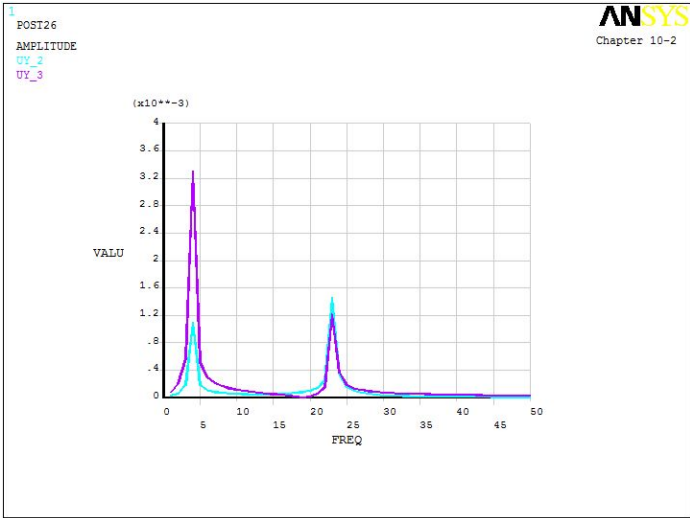


图 10.40 节点响应随频率变化曲线



本实例中采用的梁单元为空间梁单元 BEAM188 ,具有 6 个自由度。需要指出的是 ,图 10.40 显示的是两个球节点的 y 方向响应随频率变化的曲线 ,从图中可以看出 ,结构模型 y 方向的一阶固有频率大约为 6.8Hz。读者也可以查看两个节点的 z 方向响应随频率变化的曲线 ,其值大约为 5.8Hz。此外 ,也可以采用平面梁单元 BEAM3 来分析该实例。

step 16 选择 **Utility Menu→File→Exit** 命令 ,弹出 **Exit from ANSYS** 对话框 ,选择 **Save Everything** 单选按钮 ,单击 **OK** 按钮 ,关闭 **ANSYS** 程序。

10.3.4.3 命令流

```
/CLEAR
/UNITS, SI           !指定单位制, SI 代表国际单位系统, 即 m、kg、s 等
/PREP7

!设定材料属性及单元常数
ET,1,BEAM188
ET,2,MASS21,,,4

R,1,3.79             ! 定义节点球重量为 3.79kg
R,2,8.96e-4,23.01e-8,0.04

MP,EX,1,210E9        ! 定义材料属性
MP,NUXY,1,0.3
MP,DENS,1,7850

!创建模型
K,1,0,0,0
```




```

K,2,1.5,0,0
K,3,3,0,0

L,1,2
L,2,3

!划分网格
LATT,1,2,1,, , , ,      ! 设置属性
LESIZE,ALL,, ,5,,1,, ,  ! 每个梁分5份
LMESH,ALL                ! 划分网格

TYPE,2      !划分节点球
REAL,1
E,2
E,7

!求解
/SOLU
DK,1,ALL,

ANTYPE,HARMONIC      !设置成谐响应分析类型
HROPT,FULL           !指定FULL方法
F,7,FY,20
HARFRQ,0,50          !指定简谐载荷的频率范围为0~50Hz
NSUBST,50            !设置载荷子步数,即在0~50Hz范围内求50个解
KBC,0                !载荷形式为Ramped
SOLVE
FINISH

!结果查看
/POST26
NSOL,2,2,U,Y,UY_2    !提取节点2的数据给变量UY_2
NSOL,3,7,U,Y,UY_3    !提取节点7的数据给变量UY_3
PLVAR,2,3             !显示位移变化曲线
FINISH

```

10.4 瞬态分析及实例详解

本节介绍瞬态分析的基本原理，并结合实例介绍具体操作步骤。

10.4.1 瞬态分析的含义和应用

瞬态动力学分析（也叫时间历程分析）用于确定承受任意随时间变化的载荷的结构的动力学响应。可以用瞬态动力学分析确定结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下的随时间变化的位移、应变、应力及力。载荷和时间的相关性使得惯性力和阻尼作用比较重要。如果惯性力和阻尼作用不重要，就可以用静力学分析代替瞬态分析。

瞬态动力学的基本运动方程是：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (10-4)$$

其中, $[M]$ 为质量矩阵, $[C]$ 为阻尼矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{u\}$ 为节点位移向量, $\{F(t)\}$ 载荷可为时间的任意函数。

ANSYS 程序使用 Newmark 法和模态叠加法进行求解。

瞬态动力学分析可以应用在以下分析中。

- ◆ 承受冲击载荷的结构, 如汽车中的保险杠、桥墩及悬挂体系等。
- ◆ 承受随时间变化的载荷的结构, 如桥梁、吊车梁、地面移动装置等。
- ◆ 承受撞击和颠簸的设备, 如机械设备、家用电器、笔记本电脑等。

10.4.2 瞬态分析求解方法

瞬态动力学分析可采用 3 种方法: 完全 (Full) 法、缩减 (Reduced) 法及模态叠加 (Mode Superposition) 法。ANSYS/Professional 产品中只允许用模态叠加法。在研究如何实现这些方法之前, 先探讨一下各种方法的优点和缺点。

10.4.2.1 完全法

完全法采用完整的系统矩阵来计算瞬态响应 (没有矩阵缩减), 是 3 种方法中功能最强的, 允许包括各类非线性特性 (塑性、大变形、大应变等)。其优点如下。

- ◆ 容易使用, 不必关心主自由度或振型的选择。
- ◆ 允许各种类型的非线性特性。
- ◆ 采用完整矩阵, 不涉及质量矩阵近似。
- ◆ 通过一次分析就能得到所有的位移和应力。
- ◆ 允许施加所有类型的载荷: 节点力、外加的 (非零) 位移 (不建议采用) 和单元载荷 (压力和温度), 还允许通过 TABLE 数组参数指定表边界条件。
- ◆ 允许在实体模型上施加载荷。



如果不进行非线性相关分析, 则应当考虑采用另外两种方法, 因为完全法是 3 种方法中开销最大的一种。

10.4.2.2 缩减法

缩减法通过采用主自由度及缩减矩阵压缩问题规模, 来进行问题求解。主自由度处的位移被计算出来后, ANSYS 可将解扩展到原有的完整自由度集上。其优点是比完全法求解速度快且开销小。

缩减法的缺点如下。

- ◆ 初始解只计算主自由度的位移, 第二步进行扩展计算, 得到完整空间上的位移、应力和力。
- ◆ 不能施加单元载荷 (如压力, 温度等), 但允许施加加速度。

- ◆ 所有载荷必须加在用户定义的主自由度上（限制在实体模型上施加载荷）。
- ◆ 在整个分析过程中，时间步长必须设置恒定，不能采用自动时间步长。
- ◆ 唯一允许的非线性是简单的点点接触（间隙条件）。

10.4.2.3 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型（特征值）乘上因子并求和来计算结构的响应。其优点如下。

- ◆ 对于许多问题，它比缩减法或完全法更快、开销更小。
- ◆ 只要模态分析不采用 **Power Dynamics** 方法，即可通过 **LVSCALE** 命令将模态分析中施加的单元载荷引入到瞬态分析中。
- ◆ 可以使解按结构的固有频率聚集，可得到更平滑、更精确的响应曲线图。
- ◆ 允许考虑模态阻尼（阻尼比作为振型号的函数）。

模态叠加法的缺点如下。

- ◆ 不能施加非零位移。
- ◆ 在整个分析过程中时间步长必须设置恒定，不能采用自动时间步长。
- ◆ 唯一允许的非线性是简单的点点接触（间隙条件）。

10.4.3 瞬态分析求解步骤

完全法、模态叠加法和缩减法的瞬态分析过程基本相同，可大致归纳为如下步骤。

1、创建模型

首先要指定文件名和分析标题，然后定义单元类型、单元实常数、材料性质及几何模型。这些工作与之前在静力分析和模态分析中的相关步骤相似。

2、设置初始条件

初始条件是指零时刻时的情况，瞬态动力学分析要求给定两种初始条件（因为要求解的方程是两阶的）：初始位移和初始速度，两者的默认值为 **0**。初始加速度一般假定为 **0**，但可以通过在一个小的时间间隔内施加合适的加速度载荷来指定非零的初始加速度。

3、设置分析类型和求解控制

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Transient**，单击 **OK** 按钮，弹出 **Transient Analysis** 对话框，在 **Solution method** 栏中选择求解方法，如图 10.41 所示，单击 **OK** 按钮退出该对话框。

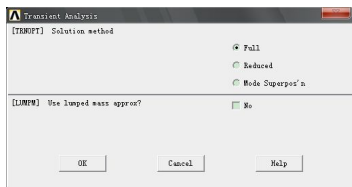


图 10.41 Transient Analysis 对话框



4、设置其他求解选项

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Control 命令，弹出 Solution Controls 对话框，单击 Transient 选项卡，其界面如图 10.42 所示。Transient effects 单选按钮用来控制是否打开时间积分效果，否则等同于静力分析，默认设置为打开。Stepped loading 是指阶跃载荷，Ramped loading 是指斜坡载荷。Mass matrix multiplier 设置框用来设置质量衰减系数，Stiffness matrix multiplier 设置框用来指定刚度衰减系数。单击 OK 按钮退出该对话框。

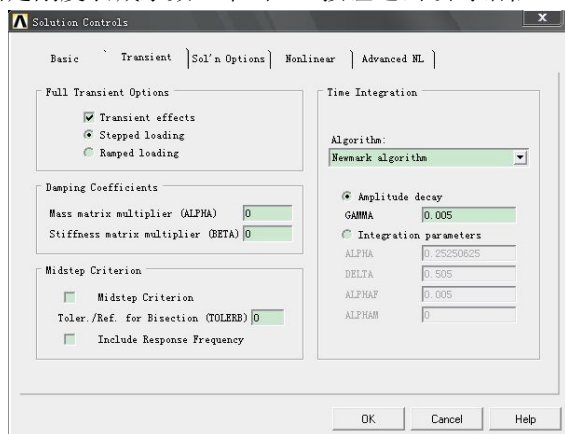


图 10.42 Solution Controls 对话框

5、施加载荷

在瞬态分析中，载荷可以施加在实体模型上（如关键点、线、面、体），也可以施加在有限元模型上（如结点、单元）。可以施加的载荷有位移、集中力、力矩、面载荷、体积载荷、温度效应及惯性载荷（如重力），也可以通过定义参数表来定义随时间变化的边界条件。

6、存储当前载荷步的载荷设置



瞬态分析需要针对载荷曲线上的每个拐点施加载荷并存储载荷配置到各自的载荷步文件中。选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File 命令。

7、重复步骤 3~6，定义其他每个载荷步

8、开始瞬态分析

选择 Main Menu→Solution→Solve→Form LS File 命令。

9、观察结果

需要注意的是，瞬态分析的结果都是时间的函数，因此通常需要在 POST26 处理器（即时间历程处理器（Time History Variables））中进行结果的查看及绘制曲线图表等。具体操作是选择 Main Menu→TimeHist Postpro 命令，弹出 Time History Variables 对话框，单击  按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，选择要查看的相应项目并赋予一个变量名，然后单击  按钮，即可进行相应变量的曲线绘制。

10.4.4 瞬态分析实例：移动载荷作用下斜拉悬臂梁结构的瞬态响应分析

10.4.4.1 问题描述与分析

斜拉结构在实际工程中有着广泛的应用，其结构形式由塔柱、拉索及空间结构（如雨篷、桥体

和屋面等)组成。从简化结构模型的角度来考虑,空间结构在一定程度上可以用悬臂梁来代替,而塔柱为拉索提供的约束可以视为铰接,结构模型如图 10.43 所示。当悬臂梁上有移动载荷 1kN,以 1.0s/m 的速度移动时,计算此过程中悬臂梁结构的位移及应力响应。

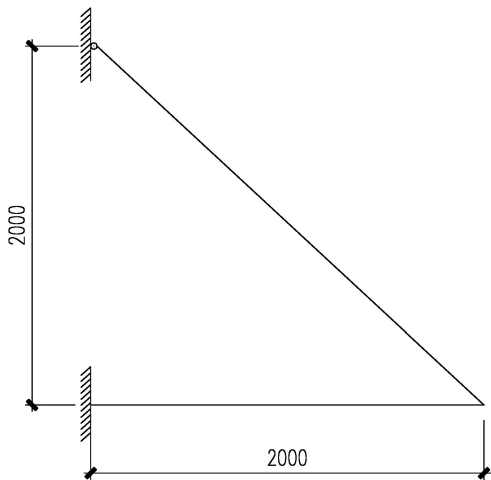


图 10.43 斜拉悬臂梁结构


结构的几何尺寸如图 10.43 所示,梁长为 3m,索悬挂点与悬臂梁固定端的竖向距离为 2m。结构的材料属性如下:弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$,密度为 7850kg/m^3 ,泊松比为 0.3。梁截面尺寸为 $0.4 \text{m} \times 0.25 \text{m}$,索截面面积为 0.004m^2 。

10.4.4.2 分析过程

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品,在 Working Directory 输入栏中输入工作目录: C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 10\10-3,在 Job Name 栏中输入工作文件名: Chapter10-3。以上参数设置完毕后,单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

step 2 选择 Main Menu→Preferences 命令,弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框,在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框,过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项,单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 3 选择单元。选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令,弹出 Element Types 对话框,单击 Add 按钮,弹出 Library of Element Types 对话框,在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 中的 3D 2 node 188 单元,同理选择 Link 10 单元模拟索,单击 OK 按钮关闭该对话框,单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

step 4 设置实常数。选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令,弹出 Define Real Constants 对话框,单击 Add 选项,选择 Link 10 单元,单击 OK 按钮,弹出 Real Constants Set Number 对话框,定义索单元截面面积为 0.004m^2 ,单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Sections→Beam→Common Sections 命令,弹出 Beam Tool 对话框,在 Sub-Type 栏中选择 “” 截面,并在 B、H 输入框中

分别输入截面参数 0.4、0.25，如图 10.44 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 5

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 $2.1\text{e}11$ ，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 Density 选项，在 Density for Material Number 1 对话框中输入 7850，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

step 6

创建关键点。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 X,Y,Z Location in active CS 栏中依次输入 1 号、2 号和 3 号关键点的坐标值：0、0、0；2、0、0；0、2、0，结果如图 10.45 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

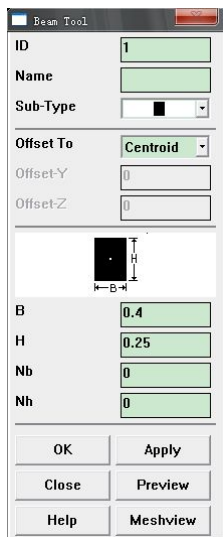


图 10.44 Beam Tool 对话框

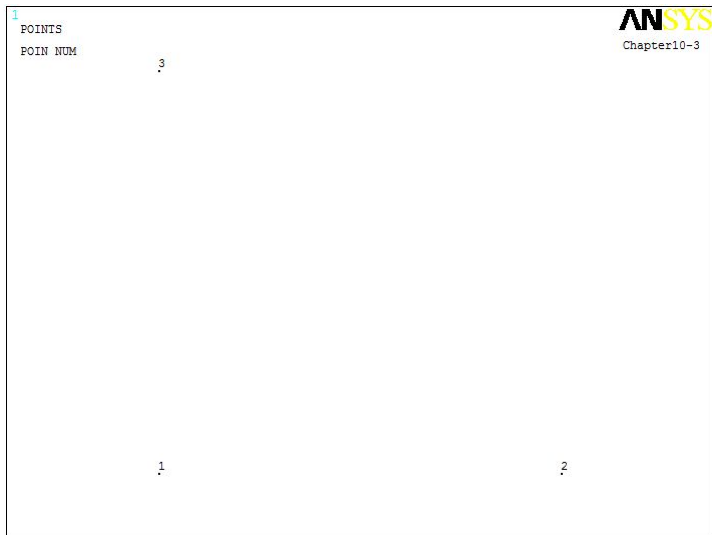


图 10.45 生成关键点后的结果

step 7

创建线。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line 命令，弹出 Create Straight Line 对话框，依次选择 1 号、2 号和 2 号、3 号关键点创建线，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 8

划分网格。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Meshing Attributes→ALL Lines 命令，弹出 Line Attributes 对话框，选择 Link 10 单元，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 命令，弹出 Element Size on Picked Lines 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口中选择索，单击 Apply 按钮，在 No. of element divisions 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮退出该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Lines 命令，用鼠标分别选择索，单击 OK 按钮，划分索单元。同理，对梁单元进行网格划分，设置梁单元属性，选择 Beam 188 单元，并划分梁单元网格为 10 份，然后选择梁进行网格划分。最后选择 Utility→PlotCtrls→Numbering...命令，设置显示节点编号，如图 10.46 所示是划分网格后结构的有限元模型结果。

step 9

施加位移约束。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Displacement**→**On Keypoints** 命令，弹出 **Apply U,ROT on Keypoints** 拾取菜单，用鼠标拾取 1 号关键点，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Apply U,ROT on Nodes** 对话框，在 **Lab2 DOFs to be constrained** 列表框中选择 **ALL DOF** 选项，同理选择 3 号关键点并约束 **UX**、**UY**、**UZ**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

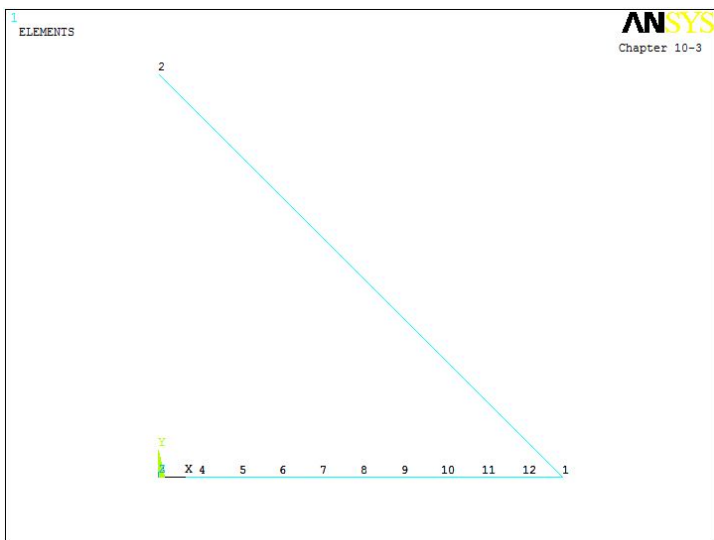


图 10.46 划分网格后的结果

step 10

设置分析类型。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Transient**，单击 **OK** 按钮，弹出 **Transient Analysis** 对话框，在 **Solution method** 栏中选择 **Full** 方法，如图 10.47 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

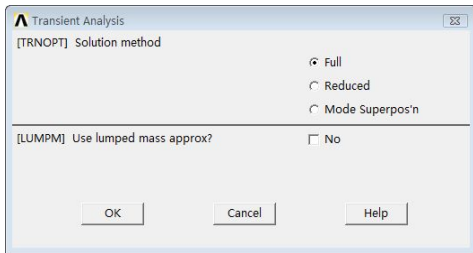


图 10.47 Transient Analysis 对话框

step 11

设置载荷步。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Sol'n Control** 命令，弹出 **Solution Controls** 对话框，在 **Basic** 选项卡中设置载荷步结束时间为 1.0，载荷子步数为 10，其他选项采用默认设置，如图 10.48 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Force/moment**→**On Nodes** 命令，在节点 3 的 Y 方向施加 -1000N 的力。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Ops**→**Write LS File** 命令，将上述载荷步设置作为载荷步 1 写入载荷步文件。重复上述操作，每隔 1.0s 将载荷步依次移动到节点 4~12 上，施加载荷前需要将上一载荷步所施加的载荷删除。

step 12

求解。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**From LS File** 命令，弹出 **Solve Load Step Files** 对话框，将起始载荷步设为 1，将结束载荷步设为 10，如图 4.49 所示，单击 **OK** 按钮，

关闭该对话框，开始计算瞬态解。求解结束后弹出 **Note** 对话框，提示 **Solution is done!**，单击 **Close** 按钮关闭该对话框。

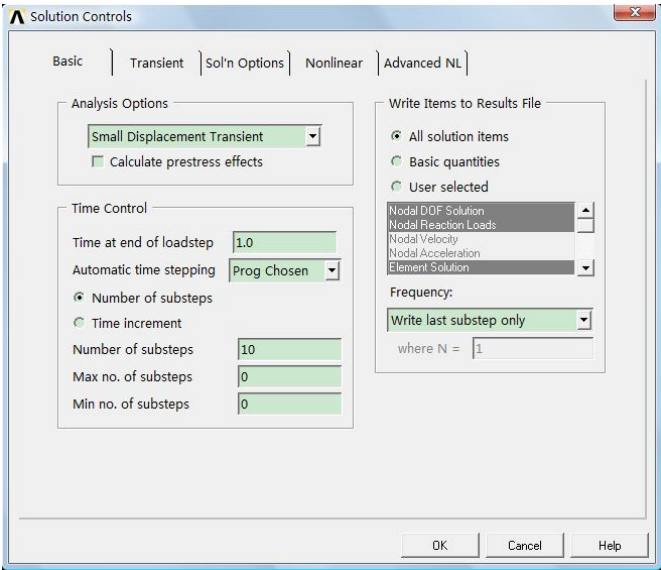


图 10.48 Solution Controls 对话框

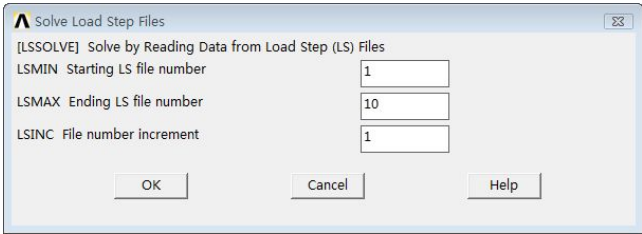


图 10.49 Solve Load Step Files 对话框

step 13 观察结果。选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Read**→**By Load Step** 命令，弹出 **Read Results by Load Step Number** 对话框，在 **Load step number** 栏中输入 5，如图 10.50 所示，单击 **OK** 按钮，退出该对话框，读入载荷步 5 的计算结果。选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solu** 命令，弹出 **Contour Nodal Solution Data** 对话框，在 **Item to be contoured** 列表框中依次展开 **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Displacement vector sum** 选项，其余选项采用默认设置，单击 **OK** 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 10.51 所示的位移场分布等值线图。

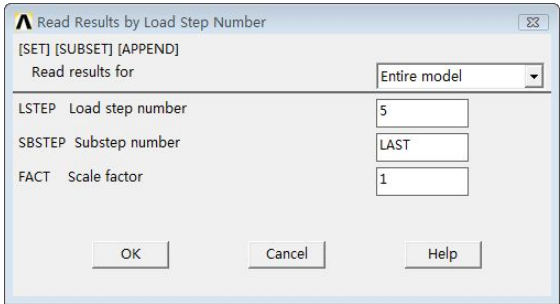


图 10.50 Read Results by Load Step Number 对话框

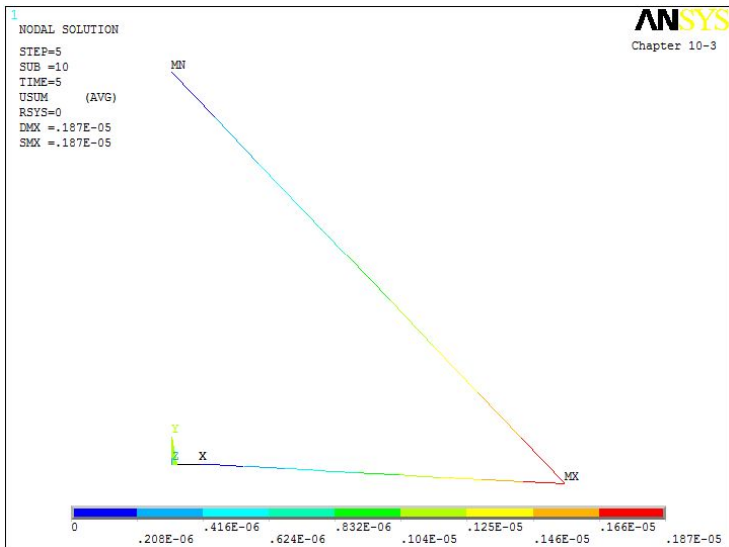




图 10.51 位移场分布等值线图

step 14

选择 Main Menu→TimeHist Postpro 命令，在弹出的 Time History Variables 对话框中单击 Add Data 按钮 ，弹出 Add Time-History Variable 对话框，依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Y-Component of displacement 选项，变量名取为 UY_2，单击 OK 按钮，弹出 Node for Data 拾取框，拾取模型节点 1，单击 OK 按钮。在 Time History Variables 对话框的变量列表中选择变量 UY_2，单击 Graph Data 按钮 ，ANSYS 显示窗口将显示斜拉悬臂梁的悬臂端在载荷移动过程中的挠度变化曲线，如图 10.52 所示。

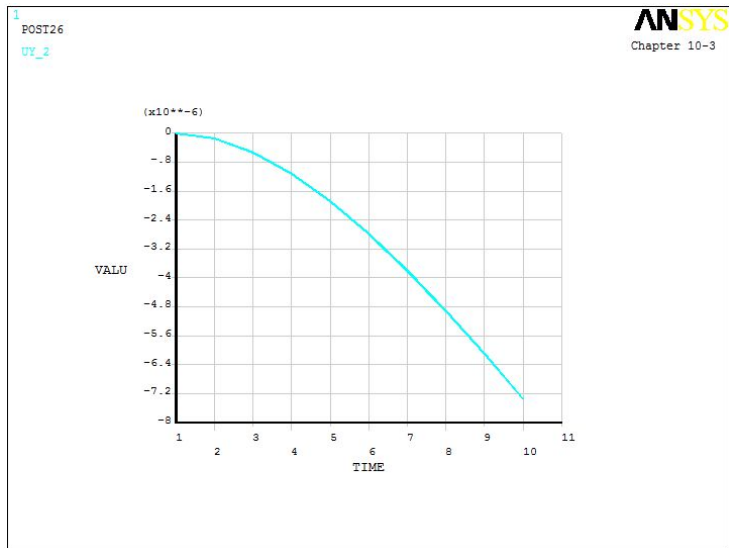


图 10.52 斜拉悬臂梁悬臂端挠度曲线

step 15

选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

10.4.4.3 命令流

```
/prep7
! 定义单元类型、 截面面积和材料属性
ET, 1, LINK10
ET, 2, BEAM188
R,1,0.0004, ,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7850
SECTYPE, 1, BEAM, RECT, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.4,0.25,0,0,0,0,0,0,0,0

! 建立模型
K,1,0,0,0 ! 建立关键点
K,2,2,0,0
K,3,0,2,0
L,1,2 ! 建立线单元
L,2,3

! 划分网格
LATT, 1, 1, 1, , , ,1 ! 设置属性
LESIZE, 2, , ,1, , , ,1 ! 设置网格大小
LMESH,2 ! 划分网格
TYPE, 2
LATT, 1, 1, 2, , , ,1
LESIZE, 1, , ,10, , , ,1
LMESH,1

! 施加约束
DK, 1,ALL, , , , , , ,
DK, 3, , , , , , UX, UY, UZ, ,
SAVE
FINISH

/solu
ANTYPE,TRANSIENT ! 设置求解类型
TRNOPT,FULL ! 设置瞬态分析方法
TIME,1
NSUBST,10 ! 设置子步数
F,3,FY,-1000
LSWRITE,1 ! 写入载荷步文件
*do,i,4,12 ! 施加移动载荷, 移动 9 次
TIME,i-2
FDELE,ALL,ALL
```

```

F,i,FY,-1000
LSWRITE,i-2
*enddo
LSSOLVE,1,10,1          !调用载荷步文件进行求解
FINISH

/POST1                  !观察应力云图
SET,5,LAST,1
PLNSOL,U,SUM,0,1.0

/POST26                 !观察挠度曲线
NSOL,2,12,U,Y,UY
PLVAR,2
FINISH

```

10.5 谱分析及实例详解

本节介绍谱分析的基本原理和用 ANSYS 进行谱分析的具体操作步骤。

10.5.1 谱分析的含义和应用

谱分析是指将模态分析的结果与一个已知的谱联系起来计算结构的位移和应力,也可以说是模态分析的扩展,用于计算结构在地震或其他随机激励作用下的响应。

谱分析主要应用在以下的结构设计中。

- ◆ 承受地震或其他随机载荷的建筑物及桥梁结构等。
- ◆ 承受不稳定或未知载荷的太空船、飞机、船只和潜艇结构等。

10.5.2 谱分析的类型及方法

谱是谱值与频率的关系曲线,它反映了时间—历程载荷的强度和频率信息。ANSYS 的谱分析有以下 3 种类型。

- ◆ **响应谱分析**: 响应谱分为单点响应谱和多点响应谱。其中,单点响应谱 (Single-point Response Spectrum, SPRS) 是指单一的响应谱激励模型中指定的点,多点响应谱 (Multi-point Response Spectrum, MPRS) 是指不同的多个响应谱分别激励模型中相应的不同点。
- ◆ **动力设计分析方法 (Dynamic Design Analysis Method, DDAM)**: 由美国海军实验室定义的一种特定类型的频谱,用于分析船用装备的抗振性。
- ◆ **功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD)**: 用于进行结构的随机振动分析。



在 ANSYS/Professional 产品中只提供单点响应谱方法。

10.5.3

响应谱分析

响应谱分析的基本步骤包括：创建模型、模态分析、谱分析、扩展模态、合并模态、观察结果。

1、创建模型

该步与其他分析类型建立模型的过程相似，即定义文件名和分析标题，定义单元类型、单元实常数、材料性质、模型几何形状等。需要注意的是，谱分析中只允许线性行为，任何非线性特性均作为线性处理；材料的非线性被忽略，但材料特性却可以是线性、各向同性或各向异性以及随温度变化或不随温度变化；要定义弹性模量 **EX** 和密度 **DENS**。

2、模态分析

结构的固有频率和模态振型是谱分析所必需的，因此在进行谱分析前需要先进行模态分析，而且只能采用 **Black Lanczos** 法、**Subspace** 法或 **Reduced** 法 3 种模态求解方法，具体过程可参考模态分析一节，需要注意的事项如下。

- ◆ 所提取的模态数目应足够多，以表示在感兴趣的频率范围内结构的响应。
- ◆ 如果采用 **GUI** 交互方式操作，若打开了模态设置对话框中的 **Expand mode shapes** 选项，将在模态分析中进行扩展操作，否则扩展操作将在谱分析求解之后进行（即模态扩展可在模态求解过程中实施，也可在谱分析以后单独扩展）。
- ◆ 如果要考虑材料的阻尼，则必须在模态分析中定义。
- ◆ 必须在施加激励谱的位置施加自由度约束。
- ◆ 求解结束后退出 **Solution** 处理器。

3、谱分析求解

（1）设置谱分析选项

选择 **Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis** 命令，在弹出的对话框中设置分析类型为 **Spectrum**，选择 **Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options** 命令，弹出 **Spectrum Analysis** 对话框，在该对话框中指定响应谱分析类型和模态扩展数，如果需要计算单元应力，则打开 **Calculate elem stresses** 选项，如图 10.53 所示。

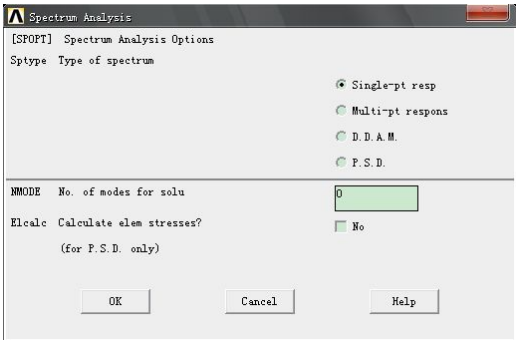


图 10.53 Spectrum Analysis 对话框

（2）设置激励谱选项

选择 **Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum** 命令，在弹出的对话框中进行相关激励谱选项设置。以单点响应谱为例，各选项的含义如下：**Seismic displac** 设置位移 (**Units: length**)，

Seismic velocity 设置速度 (length/time), Seismic accel 设置加速度 (length/time²), Force spectrum 设置力 (force amplitude multipliers), PSD (acceleration²/ (cycles/time)) 等; Excitation direction 设置激励谱方向, 通过 3 个坐标分量确定。除了力谱之外, 其余的都可以表示地震谱, 即它们都假定作用于基础上, 即有约束的节点上。力谱作用于没有约束的节点, 可以用 F 或 FK 命令施加, 方向分别用 FX, FY 和 FZ 表示。PSD 施加在非基础节点上 (ANSYS 不推荐在 SPRS 中使用 PSD 分析)。

4、扩展模态

将 Expansion Pass 对话框中的扩展模态选项 (Expansion pass option) 设置为 YES, 选择 Main Menu→Solution→New Analysis→Modal→Expansion pass-On→Load Step Opts→Expansion Pass→Single Expand→Expand Mode 命令。

需要注意的事项如下。

- ◆ 只选择有明显意义的模态进行扩展。
- ◆ 只有扩展后的模态才能进行后续的模态合并操作。
- ◆ 如果要查看应力, 则需进行应力计算, 默认状态下, 模态扩展不进行应力计算, 即谱分析不包含应力结果数据。



将 Expansion Pass 对话框中的扩展模态选项 (Expansion pass option) 设置为 YES, 意味着进行了所有模态的扩展。如果只想扩展有明显意义的模态, 就必须将模态扩展作为一个独立求解过程放在谱分析之后进行。

5、合并模态

合并模态是一个独立的求解阶段, 因此需要重新进入 ANSYS 求解器。

(1) 选择命令

选择 Main Menu→Solution 命令。

(2) 指定分析类型

选择 Main Menu→Solution→New Analysis 命令, 在打开的对话框中指定分析选项为 Spectrum。

(3) 选择模态合并方法

选择 Main Menu→Solution→New Analysis→Spectrum→Analysis Opts-SPRS→Load Step Opts-Spectrum→Spectrum-Single Point-Mode Combin 命令。

选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts-Spectrum→PSD-Mode Combin 命令。

可以输出的结果类型包括: 位移 DISP (位移, 应力, 载荷等), 速度 VELO (速度、应力速度、载荷速度等) 和加速度 ACEL (加速度、应力加速度、载荷加速度等)。

(4) 合并求解

选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令。

(5) 退出求解器

6、观察结果

(1) 单点响应谱分析的结果写入模态合并文件 Jobname.MCOM 中, 选择 Utility Menu→File→Read Input From 命令, 读入 Jobname.MCOM。关于变形形状、等值线显示、向量显示、列表显示等内容, 可参考之前章节的介绍, 此外不再赘述。

需要注意的是，若使用 **PLNSOL** 命令将衍生数据（如应力、应变）进行节点平均化处理，将导致不同材料、不同壳厚度或其他不连续性单元共有的节点平均意义十分模糊。为避免出现这种问题，在执行 **PLNSOL** 命令前，先使用 **SELECTING** 选择工具将具有同材料、相同壳体厚度等的单元选择出来，再分别执行 **PLNSOL** 命令进行节点平均化处理。

（2）随机振动分析的结果都写入结果文件 **Jobname.RST** 或 **Jobname.RST** 文件中。随机振动分析的结果可以在 **POST1** 和 **POST26** 中进行查看，在 **POST26** 中还可以计算响应功率谱和协方差。

计算响应功率谱的步骤如下。

- step 1
- 选择 Main Menu→TimeHist PostPro 命令，进入时间—历程后处理器。
- step 2
- 选择 Main Menu→TimeHist PostPro→Store Data 命令，存储频率向量。选项 **NPTS** 是加在固有频率两边以使得频率向量变得平滑的频率点的数目。
- step 3
- 选择 Main Menu→TimeHist PostPro→Define Variables 命令，保存感兴趣的结果。
- step 4
- 选择 Main Menu→TimeHist PostPro→Calc Resp PSD 命令，计算响应 PSD 并将其保存到一个指定变量中，然后可用 **PLVAR** 命令来显示响应 PSD。

计算协方差谱的步骤如下。

- step 1
- 选择 Main Menu→TimeHist PostPro 命令，进入时间—历程后处理器。
- step 2
- 选择 Main Menu→TimeHist PostPro→Store Data 命令，存储频率向量。选项 **NPTS** 是加在固有频率两边以使得频率向量变得平滑的频率点的数目。
- step 3
- 选择 Main Menu→TimeHist PostPro→Define Variables 命令，保存感兴趣的结果。
- step 4
- 选择 Main Menu→TimeHist PostPro→Calc Resp PSD 命令，计算响应 PSD 并将其保存到一个指定变量中，然后可用 **PLVAR** 命令来显示响应 PSD。



在随机振动分析中，“应力”并不是实际的应力而是应力的统计值，由 **PLNSOL** 命令显示的节点应力可能是不合理的。

10.5.4 谱分析实例：地震位移谱作用下三角平台结构响应分析

10.5.4.1 问题描述与分析

三角平台为直角三角形，两直角边的边长为 **1.414m**，斜边长为 **2m**，平台柱子高为 **1m**。三角平台在坐标系中的坐标位置如图 **10.54** 所示，单位为 **m**。材料属性如下：弹性模量为 $2.1\times 10^{11}\text{N/m}^2$ ，密度为 7850kg/m^3 ，泊松比为 **0.3**。柱子截面尺寸为 口 **800×400×16**，平台板厚度为 **25mm**。计算在 **X** 方向的地震位移谱作用下三角平台的响应情况，地震响应谱如表 **10.2** 所示。

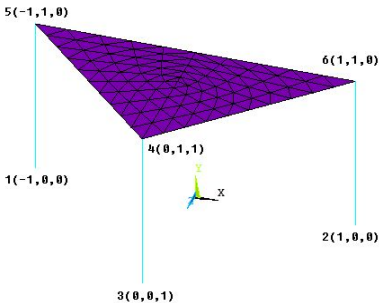


图 10.54 三角平台结构模型

表 10.2 地震响应谱

频率/Hz	位移/mm
0.5	2
1.2	9
2.4	8
3.6	12
4.8	75
6.0	86

该问题属于单点响应谱分析问题，在分析中，根据图 10.54 建立几何模型，并选择 BEAM188 梁单元和 SHELL63 壳单元分别模拟柱和板进行分析。

10.5.4.2 求解过程

- step 1
- 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 10\10-4，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter10-4。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。
- step 2
- 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。
- step 3
- 选择单元。选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 中的 3D 2 node 188 单元，同理选择 SHELL 63 单元模拟平台板，单击 OK 按钮关闭该对话框。此时，Element Types 对话框如图 10.55 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

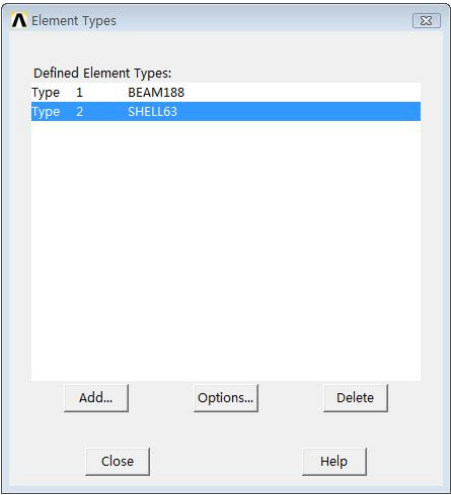


图 10.55 Element Types 对话框

- step 4
- 设置实常数。选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，

弹出 Define Real Constants 对话框, 单击 Add 选项, 选择 SHELL63, 单击 OK 按钮, 弹出 Real Constant Set Number 1, for SHELL63 对话框, 定义板厚为 0.025m, 如图 10.56 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Sections→Beam→Common Sections 命令, 弹出 Beam Tool 对话框, 在 Sub-Type 栏中选择方管截面, 并在 W1、W2、t1、t2、t3、t4 栏中分别输入截面参数 0.8、0.4、0.016、0.016、0.016、0.016, 如图 10.57 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

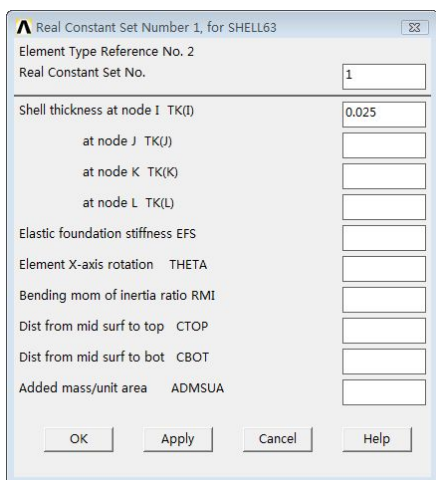


图 10.56 Real Constant Set Number1, for SHELL63 对话框

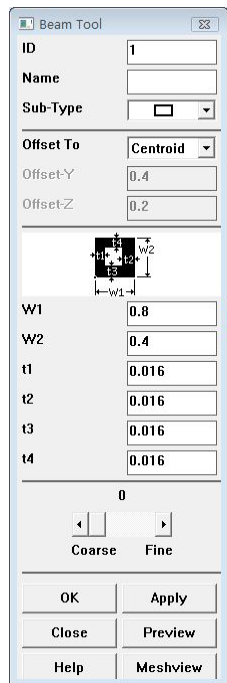


图 10.57 Beam Tool 对话框



如果 SHELL63 单元的厚度不变, 只需输入 TK(I) 即可, 程序默认单元的厚度均匀变化; 如果厚度是变化的, 则需输入每个节点的厚度。

step 5

设置材料及单元属性。选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令, 弹出 Define Material Model Behavior 对话框, 在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项, 弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框, 在 EX 输入栏中输入 2.1e11, 在 PRXY 输入栏中输入 0.3, 单击 Density 选项, 在 Density for Material Number 1 对话框中输入 7850, 单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令, 关闭该对话框。

step 6

创建关键点。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 命令, 弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框, 在 X,Y,Z Location in active CS 栏中依次输入 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号和 6 号关键点的坐标值 -1, 0, 0; 1, 0, 0; 0, 0, 1; 0, 1, 1; -1, 1, 0; 1, 1, 0, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 7

创建面及线。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs 命令，选择 4、5、6 号节点创建平台板。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line 命令，弹出 Create Straight Line 对话框，依次选择 1 号、5 号，3 号、4 号，2 号、6 号关键点创建线，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 8

划分网格。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Meshing Attributes→ALL Lines 命令，弹出 Line Attributes 对话框，选择 Beam188 单元，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 命令，弹出 Element Size on Picked Lines 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口中选择 3 个柱子直线，单击 Apply 按钮，在 No. of element divisions 栏中输入 10，单击 OK 按钮退出该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Lines 命令，用鼠标分别选择柱子，单击 OK 按钮，划分梁单元。同理，设置网格划分属性为 SHELL63 单元，并将其划分为三角形单元，单元网格设为 10 份。图 10.58 所示为划分网格之后的有限元模型。

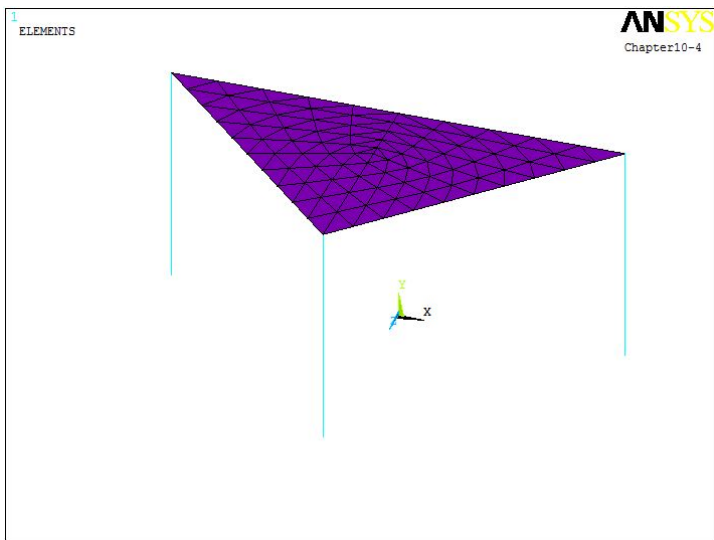


图 10.58 三角平台有限元模型

step 9

施加位移约束。选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints 命令，弹出 Apply U,ROT on Keypoints 拾取菜单，用鼠标拾取 1 号、2 号和 3 号关键点，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 ALL DOF 选项。

step 10

设置模态分析。选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，设置分析类型为 Modal，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 命令，弹出 Modal Analysis 对话框，选择 Block Lanczos 方法，设置提取模态数为 10，如图 10.59 所示，单击 OK 按钮，弹出 Block Lanczos Method 对话框，设置截止频率为较大值，本例设为 1000000，如图 10.60 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Expansion Pass→Single Expand→Expand Mode 命令，弹出 Expand Modes 对话框，设置扩展 10 阶模态，单击 OK 按钮关

闭该对话框。

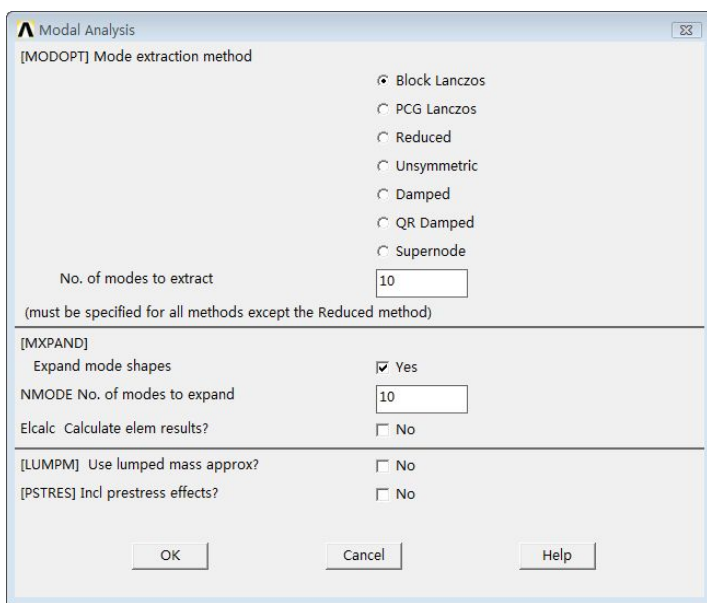


图 10.59 Modal Analysis 对话框

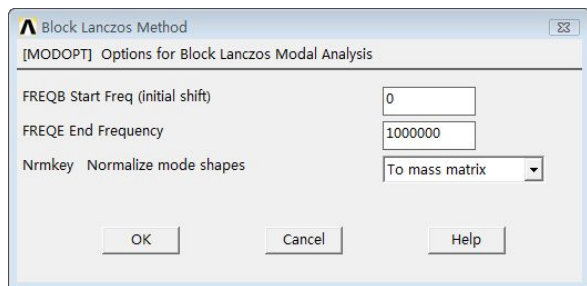


图 10.60 Block Lanczos Method 对话框



扩展模态也可以在谱分析求解之后单独进行。

step 11

求解。选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令,弹出 Solve Current Load Step 对话框,单击 OK 按钮,开始模态分析计算。求解结束后弹出 Note 对话框,提示 Solution is done!,单击 Close 按钮关闭该对话框,并退出求解器。

step 12

设置谱分析。选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令,设置分析类型为 Spectrum。选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 命令,在 Spectrum Analysis 对话框中设置谱分析类型为 Single-pt resp,模态求解数设为 10,如图 10.61 所示。

step 13

设置地震响应谱方向。选择 Main Menu→Solution→Load Setp Opts→Spectrum→Single Point→Settings 命令,弹出 Settings for Single-Point Response Spectrum 对话框,在 Type of response spectr 下拉列表框中选择 Seismic displac 选项,在 Excitation direction 栏中输入 1、0、0,如图 10.62 所示,单击 OK 按钮退出。

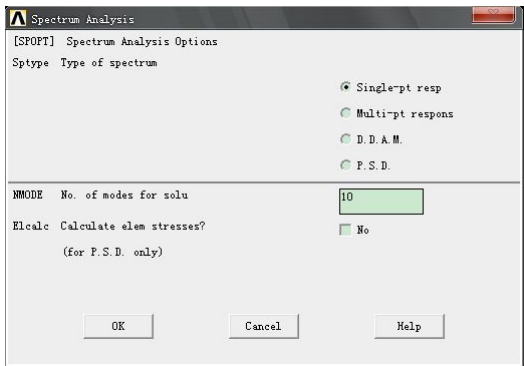


图 10.61 Spectrum Analysis 对话框

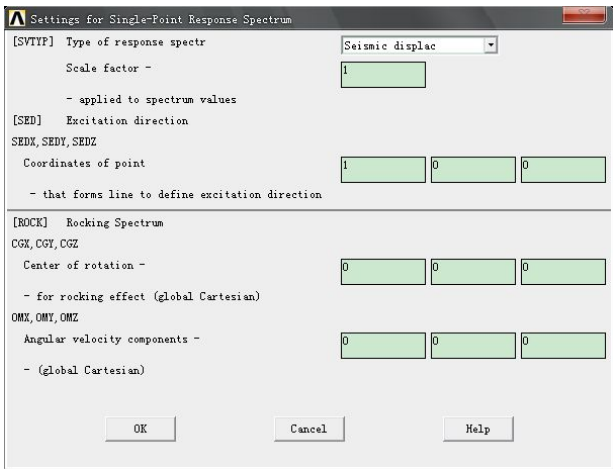


图 10.62 Settings for Single-Point Response Spectrum 对话框

step 14

输入地震响应谱。选择 Main Menu → Solution → Load Setp Opts → Spectrum → Single Point → Freq Table 命令，弹出 Frequency Table 对话框，在 FREQ1~FREQ6 栏中依次输入 0.5, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0，如图 10.63 所示，单击 OK 按钮退出。选择 Main Menu → Solution → Load Setp Opts → Spectrum → Single Point → Spectrum values-Damping Ratios 对话框，设置阻尼比为 0，如图 10.64 所示，单击 OK 按钮，在 Spectrum Values 对话框的 FREQ1~FREQ6 输入栏中依次输入 0.002, 0.009, 0.008, 0.012, 0.075, 0.086，如图 10.65 所示，单击 OK 按钮退出。

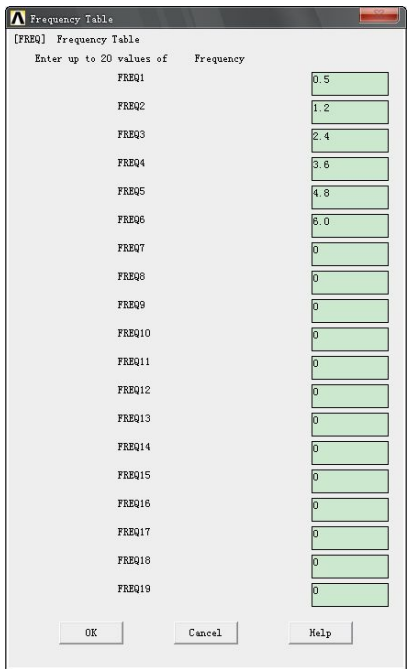


图 10.63 Frequency Table 对话框

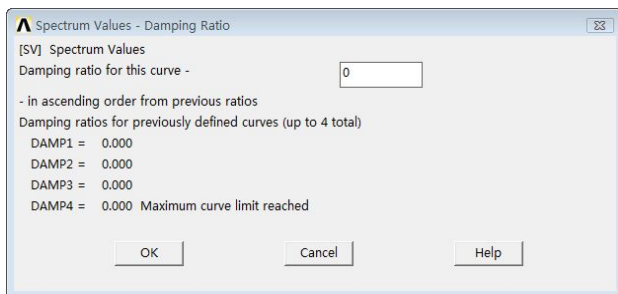


图 10.64 Spectrum Values-Damping Ratio 对话框

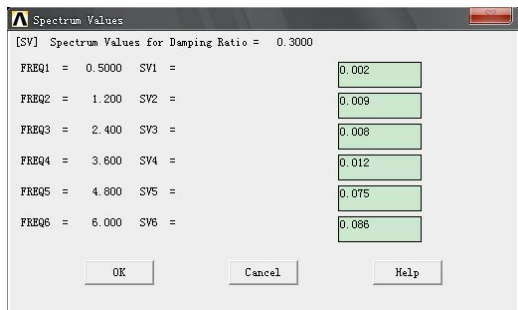


图 10.65 Spectrum Values 对话框

step 15

谱分析求解。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**Current LS** 命令，弹出 **Solve Current Load Step** 对话框，单击 **OK** 按钮，开始谱分析计算。求解结束后弹出 **Note** 对话框，提示 **Solution is done!**，单击 **Close** 按钮关闭该对话框，并退出求解器。

step 16

模态合并。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Load Setp Opts**→**Spectrum**→**Single Point**→**Mode Combine** 命令，弹出 **Mode Combination Methods** 对话框，选择模态合并方式为 **SRSS**，在 **Significant threshold** 栏中输入 **0.002**，在 **Type of output** 下拉列表框中选择 **Displacement** 选项，如图 10.66 所示，单击 **OK** 按钮退出。



图 10.66 Mode Combination Methods 对话框

step 17

模态合并求解。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**Current LS** 命令，弹出 **Solve Current Load Step** 对话框，单击 **OK** 按钮，开始谱分析计算。求解结束后弹出 **Note** 对话框，提示 **Solution is done!**，单击 **Close** 按钮关闭该对话框，并退出求解器。

step 18

观察结果。进入通用后处理器，读入结果文件，选择 **Utility Menu**→**File**→**Read Input from** 命令，在打开的窗口中选择结果文件 **Jobname.mcom**，单击 **OK** 按钮。选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solo** 命令，弹出 **Contour Nodal Solution Data** 对话框，在 **Item to be contoured** 列表框中依次展开 **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Displacement vector sum** 选项，其余选项采用默认设置，单击 **OK** 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 10.67 所示的位移场分布等值线图。

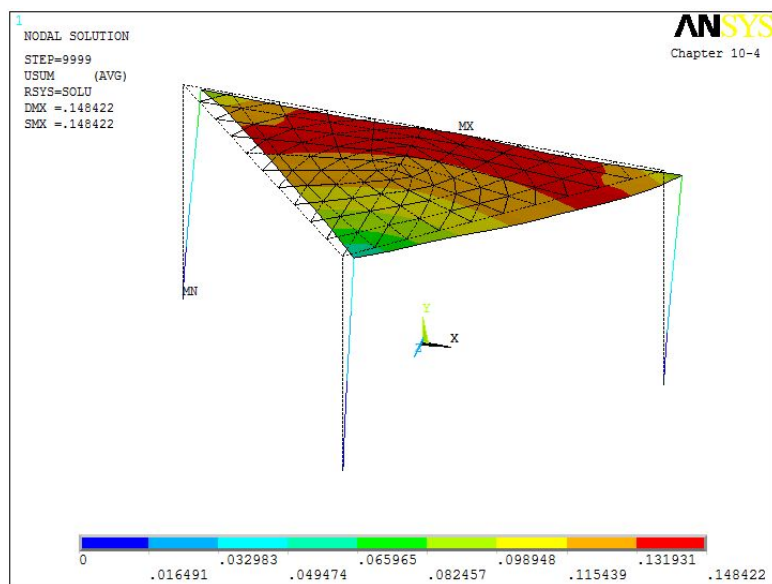


图 10.67 位移场分布等值线图

step 19 选择 **Utility Menu**→**File**→**Exit** 命令，弹出 **Exit from ANSYS** 对话框，选择 **Save Everything** 单选按钮，单击 **OK** 按钮，关闭 **ANSYS** 程序。

10.5.4.3 命令流

```

/PREP7                                !建模
ET,1,BEAM188
ET,2,SHELL63

R,1,0.025, , , , ,                    !实常数
SECTYPE, 1, BEAM, HREC, , 1
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.8,0.4,0.016,0.016,0.016,0.016

MP,EX,1,2.1e11                        !材料属性
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7850

K, 1,-1,0,0
K, 2,1,0,0
K, 3,0, 0,1
K, 4,0,1,1
K, 5,-1,1,0
K, 6,1,1,0

A,4,5,6                                !建立面
L, 1, 5
L, 3, 4
L, 2, 6

```



```

LATT,1,1,1, , , ,1
LSEL, , , ,ALL
LESIZE,ALL, , ,10, , , , ,1
LMESH,4,6

TYPE, 2
MSHAPE,1,2D !指定划分单元的形状为三角形单元
MSHKEY,1
AMESH,1

/SOLU !求解
KSEL,S,KP,,1,3
DK,ALL, , , ,0,ALL, , , , , , !施加约束

ANTYPE,MODAL !取前十阶模态
MODEOPT,LANB,10
MXPAND,10, , ,0
MODEOPT,LANB,10,0,1000000, ,OFF
MXPAND,10,0,1000000,0,0.001,
SOLVE
FINISH

!谱分析
/SOLU
ANTYPE,SPECTR
SPOPT,SPRS,10,yes !单点响应谱,10阶模态参与计算,计算单元应力
SVTYP,3 !指定单点响应波谱的类型为地震位移响应谱
SED,1,0,0, !为单点响应谱指定激励方向
FREQ,0.5,1.2,2.4,3.6,4.8,60 !设定激励谱中的频率点
SV,0,0.002,0.009,0.008,0.012,0.075,0.086, !指定与频率点相对应的频谱值
SOLVE
FINISH

!模态合并
/SOLU
ANTYPE,SPECTR
SRSS,0.002,DISP !以平方根的平方和模式进行模态合并
SOLVE
FINISH

!观察结果
/POST1
/INPUT,,mcom !读入 Jobname.MCOM 文件
/EFACET,1
PLNSOL,U,SUM, 1,1.0 !用等值线云图显示结果
FINISH

```



10.6 小结

本章系统地介绍了 ANSYS 结构动力学分析的 4 种方法的基本原理，并通过 4 个实际工程实例详细讲解了 4 种方法的 ANSYS 操作过程。通过本章的学习，希望读者能够掌握 ANSYS 结构动力学分析的精髓。



第 11 章 ANSYS 结构非线性分析

本章包括

- ◆ 非线性分析的基本过程
- ◆ 实例详解 1：细长杆失稳分析
- ◆ 实例详解 2：橡胶圆筒受压分析

结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例地变化。根据形成原因的不同，非线性分析分为几何非线性、材料非线性和状态非线性三大类。这三种结构非线性在日常生活中有很多实际的应用和体现。随着计算机应用水平的逐渐增强，有限元方法已在该领域得到了广泛的应用。

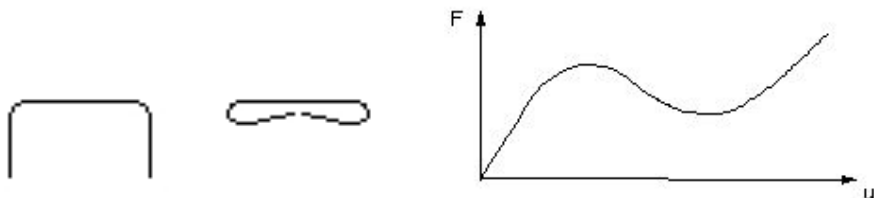
本章主要介绍 ANSYS 结构非线性分析的基本方法，给出了几何非线性实例和材料非线性实例，方便加深读者对 ANSYS 结构非线性分析的理解。

11.1 结构非线性分析的基本过程

本节介绍结构非线性分析的基本概念和 ANSYS 操作的基本过程。

11.1.1 结构非线性分析概述

在日常生活中，经常会遇到结构非线性。例如，无论何时用订书针订书，金属订书针永远会被弯曲成一个形状，如图 11.1 (a)所示；如在一个木架上放置重物，随着时间的迁移，它将越来越下垂如图 11.1 (b)所示；当在汽车或卡车上装货时，轮胎和路面间的接触程度将随货物重量的变化而变化，如图 11.1 (c)所示。如果将上面例子的载荷变形曲线画出来，将发现它们都显示了非线性结构的基本特征——变化的结构刚性。



a) 订书针

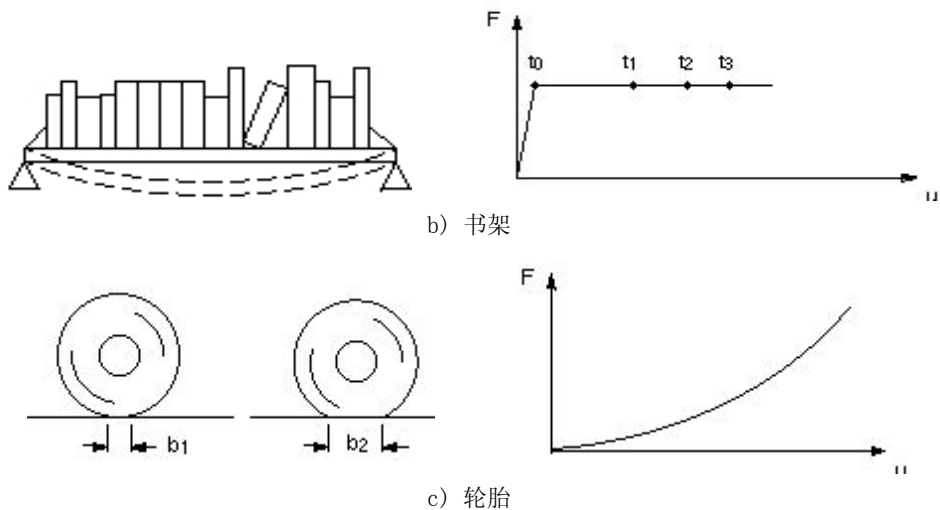


图 11.1 非线性结构行为的普通例子

引起结构非线性的原因很多，主要可以分成 3 种类型：几何非线性、材料非线性及状态非线性（包括接触）。下面将进行详细的说明。

11.1.2 几何非线性

结构几何形状的变化引起结构响应的非线性称为结构的几何非线性。如果结构经受大变形，它几何形状的变化可能会引起结构的非线性地响应，如图 11.2 所示，随着纵向载荷的增加，杆不断弯曲，使动力臂明显减小，导致杆端显示出较高载荷下不断增长的刚性。

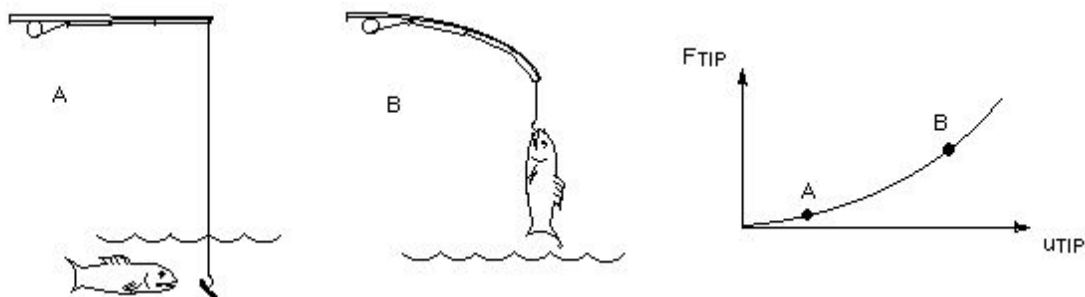


图 11.2 钓鱼杆的几何非线性行为

11.1.3 材料非线性

非线性的应力—应变关系是结构非线性的常见原因。许多因素可以影响材料的应力—应变性质，比如加载历史（如在弹—塑性响应状况下）、环境状况（如温度）和加载的时间总量（如在蠕变响应状况下）等。

11.1.4 状态非线性

结构所处状态的不同引起结构响应的非线性称为状态非线性。许多普通结构的表现出一种与状



态相关的非线性行为，例如，一根只能拉伸的电缆可能是松散的,也可能是绷紧的；轴承套可能是接触的,也可能是不接触的；冻土可能是冻结的,也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变在不同的值之间突然变化。状态改变也许和载荷直接有关（如在电缆情况中），也可能由某种外部原因引起（如在冻土中的紊乱热力学条件）。在 ANSYS 程序中，用单元的生与死选项来给这种状态的变化建模。

11.1.5

非线性分析在 ANSYS 中的实现

ANSYS 进行非线性分析的基本原理就是应用有限单元法，将结构划分为有限个单元，在各个节点之间建立非线性方程组，非线性方程组的解法是非线性问题有限元分析所涉及的基本问题。非线性方程组通常可以表示如下。

$$\Psi(a) = P(a) - Q = 0 \qquad \text{或} \qquad P(a) = Q \qquad (11.1)$$

方程(11.1)的具体形式通常取决于子问题的性质和离散的方法。 a 是待求解的未知量， $P(a)$ 是 a 的非线性函数向量， Q 是独立于 a 的已知向量。在以位移为未知量的有限元分析中， a 是结点位移向量， Q 是结点载荷向量。

目前，我们常用的非线性方程组解法有直接迭代法、牛顿—拉普森方法和增量法等。ANSYS 程序的方程求解器可以用来计算一系列联立线性方程，进而预测工程系统的响应。然而，非线性结构的行为不能直接用这样一系列的线性方程表示，而是需要通过一系列的带校正的线性近似来求解非线性问题。

非线性求解的近似方法是 将载荷分成一系列的载荷增量，可以在几个载荷步内或者在一个载荷步的几个子步内施加载荷增量。在每个增量求解完成后，继续进行下一个载荷增量之前，程序调整刚度矩阵，以反映结构刚度的非线性变化。遗憾的是，纯粹的增量近似不可避免地随着每一个载荷增量积累误差，导致结果最终失去平衡，误差越来越大，如图 11.3(a)所示。

为了克服这样的困难，ANSYS 程序使用牛顿—拉普森平衡迭代方法 (NR)，它迫使在每个载荷增量的末端的解在某个容限范围内达到平衡收敛。图 11.3(b)描述了在单自由度非线性分析中牛顿—拉普森平衡迭代的使用。在每次求解前，NR 方法估算出残差矢量，这个矢量对应于单元应力载荷的恢复力和所施加载荷的差值。然后使用非平衡载荷进行线性求解，并核查收敛性。如果不满足收敛准则，可重新估算非平衡载荷，修改刚度矩阵，获得新解。持续这种迭代过程直到问题收敛。ANSYS 程序提供了一系列命令来增强问题的收敛性，如自适应下降、线性搜索、自动载荷步及二分等，可加强问题的收敛性。



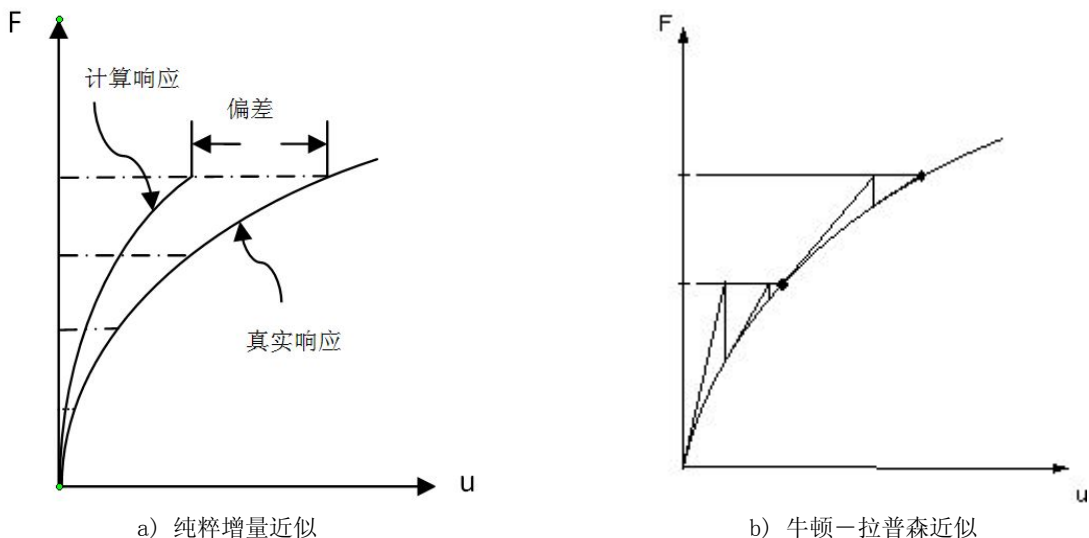


图 11.3 纯粹增量近似与牛顿-拉普森近似的关系

非线性求解被分成 3 个操作级别：载荷步、子步和平衡迭代。载荷步属于顶层级别，由在一定“时间”范围内确定的载荷步组成，并假定载荷在载荷步内是线性变化的。子步属于中间级别，在每一个载荷子步内，为了逐步加载，可以控制程序来执行多次求解（子步或时间步）。平衡迭代为底层级别，在每一个子步内，程序将进行一系列的平衡迭代，以获得收敛的解。图 11.4 说明了一段用于非线性分析的典型载荷历史。

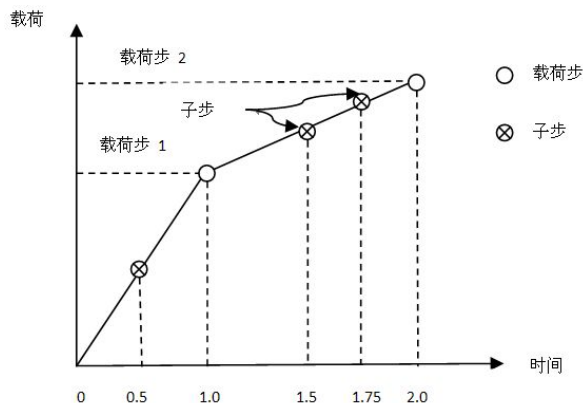


图 11.4 载荷步、子步及时间

如果想对平衡迭代设定收敛容限，首先应思考如下问题。

- ◆ 基于载荷、变形，还是联立二者来确定收敛容限？
- ◆ 既然径向偏移（以弧度度量）比对应的平移小，是不是想对这些不同的项目建立不同的收敛准则？

当确定收敛准则时，ANSYS 程序可以将收敛检查建立在力、力矩、位移、转动或这些项目的任意组合上。另外，每一个项目可以有不同的收敛容限值。对多自由度问题，同样也有收敛准则的选择问题。需要说明的是，以力为基础的收敛提供了收敛的绝对量度，而以位移为基础的收敛仅提供

了表现收敛的相对量度。

当使用多个子步时，需要考虑精度和代价之间的平衡；更多的子步（即小的时间步）通常导致较好的精度，但却是以增多的运行时间为代价的。**ANSYS** 提供如下两种方法来控制子步数。

- ◆ 子步数或时间步长，即可以通过指定实际的子步数，也可以通过指定时间步长来控制子步数。
- ◆ 自动时间步长，即 **ANSYS** 程序基于结构的特性和系统的响应来自动调整时间步长。

11.1.6

非线性分析的基本过程

尽管非线性分析比线性分析更加复杂，但处理过程基本相同。只是在非线性分析的基本过程中，添加了需要的非线性特性。非线性静力分析是静力分析的一种特殊形式。和普通静力分析一样，其处理过程主要由建模、加载求解和后处理查看结果 3 个主要步骤组成。

步骤 1：建模

非线性分析在这一步中可能包括特殊的单元或非线性材料性质。如果模型中包含大应变效应，应力—应变数据必须依据真实应力和真实（或对数）应变来表示。

步骤 2：加载求解

非线性求解不同于线性求解，它经常要求多个载荷增量，且总是需要平衡迭代，处理过程如下。

1. 进入 ANSYS 求解器

命令： /Solution
GUI: Main Menu→Solution

2. 定义分析类型及分析选项

分析类型和分析选项在第一个载荷步后不能被改变，**ANSYS** 提供这些选项用于静力分析，如表 11.1 所示。具体选项本文不作详细介绍，可参见 **ANSYS** 帮助文件。

表 11.1 分析类型和分析选项

选项	命令	GUI 路径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu → Solution → Analysis Type → New Analysis → Restart
Analysis Type:Static	ANTYPE	Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis→Static
Large Deformation Effects	NLGEOM	Main Menu→Solution→Analysis Options
Stress Stiffening Effects	SSTIF	Main Menu→Solution→Analysis Options
Newton-Raphson Option	NROPT	Main Menu→Solution→Analysis Options
Equation Solver	EQSLV	Main Menu→Solution→Analysis Options

3. 在模型上加载

在大变形分析中，惯性力和点载荷将保持恒定的方向，但表面力将“跟随”结构而变化。

4. 指定载荷步选项

这些选项可以在任何载荷步中改变，下面进行详细阐述。

(1) 普通选项

Time (TIME): ANSYS 程序借助在每一个载荷步末端给定的 TIME 参数识别出载荷步和子步, 使用 TIME 命令来定义受某些实际物理量 (如先后时间, 所施加的压力等) 限制的 TIME 值。程序通过这个选项来指定载荷步的末端时间。



在没有指定 TIME 值时, 程序将默认自动地对每一个载荷步按 1.0 增加 TIME (在第一个载荷步的末端以 TIME=1.0 开始)。

时间步的数目 (NSUBST) 和时间步长 (DELTIM): 非线性分析要求在每一个载荷步内有多个子步 (或时间步), 这样 ANSYS 才可以逐渐施加给定的载荷, 得到精确的解。NSUBST 和 DELTIM 命令都能获得同样的效果, 即给定载荷步的起始、最小及最大步长。NSUBST 定义在一个载荷步内将被使用的子步的数目, 而 DELTIM 明确地定义时间步长。

- ◆ **渐进式或阶跃式加载:** 在与应变率无关的材料行为的非线性静力分析中, 通常不需要指定这个选项, 因为依据默认项, 载荷将为渐进的阶跃式载荷 (KBC, 1)。
- ◆ **自动时间分步 (AUTOTS):** 这一选项允许程序确定子步间载荷增量的大小和决定在求解期间是增加还是减小时间步 (子步) 长。该选项默认为 OFF (关闭), 用户可以用 AUTOTS 命令打开自动时间步长和二分法。通过激活自动时间步长, 可以让程序决定在每一个载荷步内使用多少个时间步。

(2) 非线性选项

程序将连续进行平衡迭代, 直到满足收敛准则, 或者达到允许的平衡迭代的最大数 (NEQIT)。可以用默认的收敛准则, 也可以自己定义收敛准则。

- ◆ **收敛准则 (CNVTOL):** 依据默认收敛准则, 程序将以 VALUE · TOLER 的值对力 (或者力矩) 进行收敛检查。VALUE 的默认值是在所加载荷的 SRSS 和 MINREF 中取值较大者。TOLER 的默认值是 0.001。用户可以添加位移 (或者转动) 收敛检查。对于位移, 程序将收敛检查建立在当前 (i) 次和前面 (i-1) 次迭代之间的位移改变上。



如果明确地定义了任何收敛准则 (CNVTOL), 默认准则将“失效”。因此, 如果定义了位移收敛检查, 将不得不再定义力收敛检查 (使用多个 CNVTOL 命令来定义多个收敛准则)。

- ◆ **用户收敛准则:** 可以定义用户收敛准则来替代默认值。使用严格的收敛准则将提高结果精度, 但将以更多次的平衡迭代为代价。一般可通过调整 TOLER 值而不是 VALUE 值来改变收敛准则。同时应确保 MINREF=1.0 的默认值在分析范围内有意义。
- ◆ **NEQIT (平衡迭代的最大次数):** 使用这个选项来对在每一个子步中进行的最大平衡迭代次数实行限制 (默认为 25)。如果在这个平衡迭代次数之内不能满足收敛准则, 且自动步长是打开的 (AUTOTS), 分析将尝试使用二分法。如果二分法仍不可行, 那么分析将终止或者依据用户在 NCVN 命令中发出的指示进行下一个载荷步。
- ◆ **NCNV (求解终止选项):** 该选项处理 5 种不同的终止准则, 包括终止分析和程序执行的准

则、限制累积迭代次数设置、限制整个时间设置、限制整个 CPU 时间设置以及弧长选项 (ARCLen)。

(3) 输出控制选项

- ◆ OUTPR (打印输出): 使用这个选项来在输出文件 (Jobname.out) 中包括想要的结果数据。
- ◆ OUTRES (结果文件输出): 这个选项控制结果文件中的数据 (Jobname.rst)。



恰当使用多个 OUTRES 或 OUTPR 命令有一些技巧。依据默认设置, 在非线性分析中只有最后一个子步被写入结果文件。要写入所有子步, 须设置 OUTRES 中的 FREQ 域为 ALL; 依据默认设置, 只有 1000 个结果集 (子步) 可以被写入结果文件, 如果超过了这个数目 (基于 OUTRES 指定), 程序将会由于错误而终止。使用命令/CONFIG, NRES 可增加这个界限。

5. 开始求解计算

命令: SOLVE

GUI: Main Menu→Solution→-Solve Current LS

6. 重复步骤 3~5

如果需要定义多个载荷步, 对每一个其余的载荷步重复步骤 3~5。

7. 离开 SOLUTION 处理器

命令: FINISH

GUI: 关闭 Solution 菜单。

步骤 3: 后处理查看结果

非线性静力分析的结果主要由位移、应力、应变以及反作用力组成。可以用 POST1 (通用后处理器) 或 POST26 (时间历程后处理器) 来查看这些结果。

用 POST1 一次仅可读取一个子步, 且来自那个子步的结果应当已被写入 Jobname.rst 文件。载荷步选项命令 OUTRES 控制哪一个子步的结果被存储入 Jobname.rst 文件内。



用 POST1 查看结果时, 数据库中的模型必须与用于求解计算的模型相同。而且结果文件 (Jobname.rst) 必须是可用的。

也可以使用 POST26 查看非线性结构的载荷-历程响应。使用 POST26 可以比较一个 ANSYS 变量与另一个变量的关系。例如, 可以用图形表示某一节点处的位移与对应的所加载荷的关系, 或者可以列出某一节点处的塑性应变和对应的 TIME 值之间的关系。

11.2 几何非线性有限元分析实例详解 1: 细长杆失稳分析

本节介绍细长杆的几何非线性失稳分析。

11.2.1 问题描述

如图 11.5 所示为一横截面为正方形的细长杆，一端固定，另一端受到竖向集中力 F 的作用，求细长杆失稳变形后的形状及位移。其中涉及的参数如下。

细长杆几何参数： $B=5\text{mm}$ ； $H=5\text{mm}$ ； $L=1000\text{mm}$

细长杆材料参数：弹性模量 $E=80\text{GPa}$ ；泊松比 $\nu=0.3$

载荷： $F=12、13、14\text{N}$

11.2.2 问题分析

在日常生活中，杆件的失稳问题时常发生，此类问题根据公式先计算其临界失稳条件 $\sigma_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$ ，其中 λ 为细长杆件的柔度。然后选择细长杆作为研究对象，建立几何模型，并选择 BEAM23 梁单元进行求解。



图 11.5 细长杆几何模型

11.2.3 求解步骤

11.2.3.1 定义工作文件名和工作标题

step 1

启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 11\11.1，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter11.1。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。



可以先在目标文件位置建立工作目录，然后单击 Browse 按钮选择工作目录；也可以通过单击 Browse 按钮来选择工作文件名。

step 2 选择 Main Menu→File→Change Title 命令, 弹出 Change Title 对话框, 在输入栏中输入 Slender rod, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

11.2.3.2 定义单元类型及材料参数

step 1 选择 Main Menu→Parameters→Scalar Parameters 命令, 弹出 Scalar Parameters 对话框, 在 Selection 输入栏中输入 B=0.005, 单击 Accept 按钮; 输入 H=0.005, 单击 Accept 按钮; 输入 L=1, 单击 Accept 按钮; 输入 A=B*H, 单击 Accept 按钮; 输入 I=B*H**3/12, 单击 Accept 按钮, 如图 11.6 所示, 单击 Close 按钮关闭该对话框。其中, I 为杆的惯性矩。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令, 在弹出的对话框中单击 Add 按钮, 弹出 Library of Element Types 对话框, 在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 中的 2D plastic 23 单元, 如图 11.7 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框, 单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

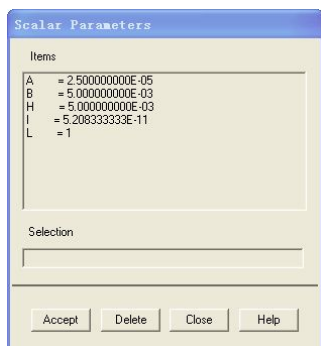


图 11.6 Scalar Parameters 对话框

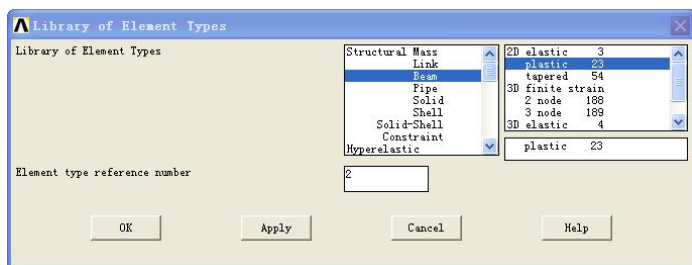


图 11.7 Library of Element Types 对话框

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令, 在弹出的对话框中单击 Add 按钮, 弹出 Element Type for Real Constants 对话框, 选择 Type 1 Beam23 选项, 单击 OK 按钮, 弹出 Real Constant Set Number 1, for BEAM23 对话框, 在该对话框中进行参数设置, 如图 11.8 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Real Constants 对话框中的 Close 按钮关闭该对话框。

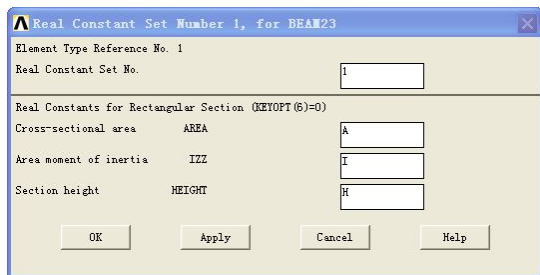


图 11.8 Real Constant Set Number 1, for BEAM23 对话框

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令, 弹出 Define Material Model Behavior 对话框, 在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项, 如图 11.9 所示, 弹出 Linear Isotropic Properties for

Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 $8e10$ ，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 11.10 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

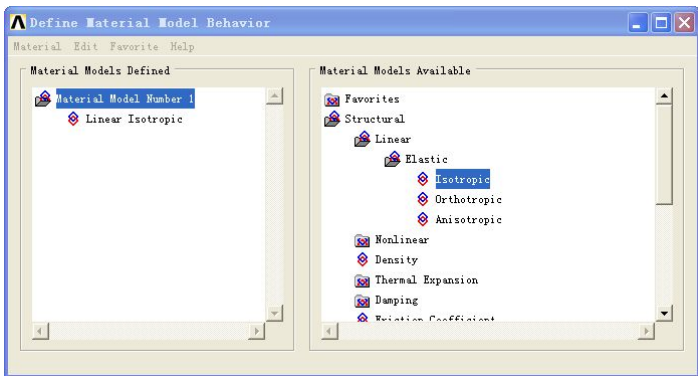


图 11.9 Define Material Model Behavior 对话框

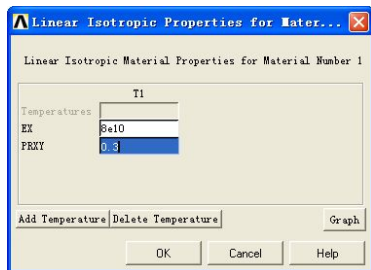


图 11.10 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 5

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

11.2.3.3 创建几何模型

step 1

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS 命令，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 1，单击 Apply 按钮；在 NODE Node number 输入栏中输入 10，在 X, Y, Z Location in active CS 栏中分别输入 0、L、0，单击 OK 按钮关闭该对话框，如图 11.11 所示。

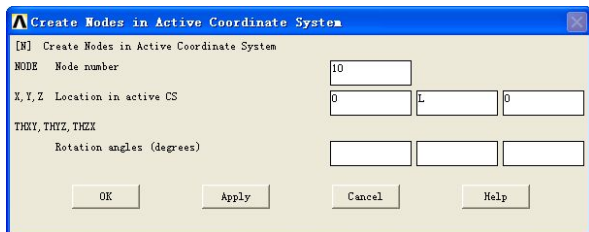


图 11.11 定义节点

step 2

选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，选中 NODE Node numbers 复选框，使其状态从 off 变为 on，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Fill between Nds 命令，弹出 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 1、10，单击 OK 按钮，弹出 Create Nodes

Between 2 Nodes 对话框，参考图 11.12 进行参数设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。此时，ANSYS 窗口将显示生成的节点模型，如图 11.13 所示。

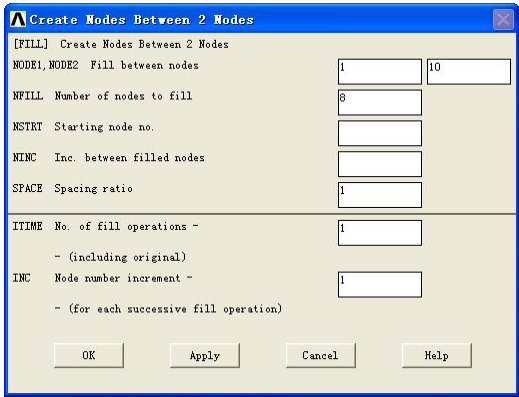


图 11.12 在两个节点之间插入 8 个节点

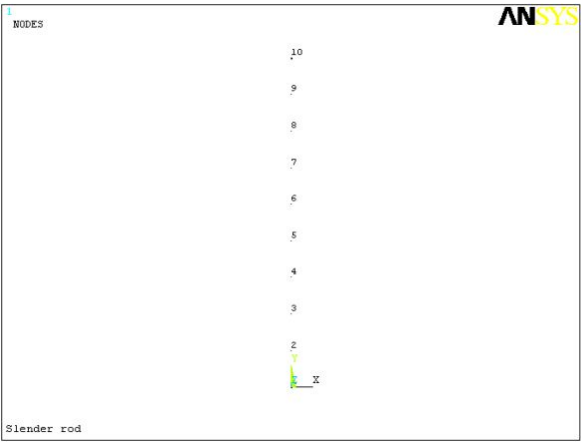


图 11.13 杆的节点显示

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes 命令，弹出 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1、2，单击 OK 按钮，在两个节点之间形成的单元如图 11.14 所示。

step 5 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Elements→Auto Numbered 命令，弹出 Copy Elms Auto-Num 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，弹出 Copy Elements (Automatically-Numbered) 对话框，参照图 11.15 对其进行参数设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

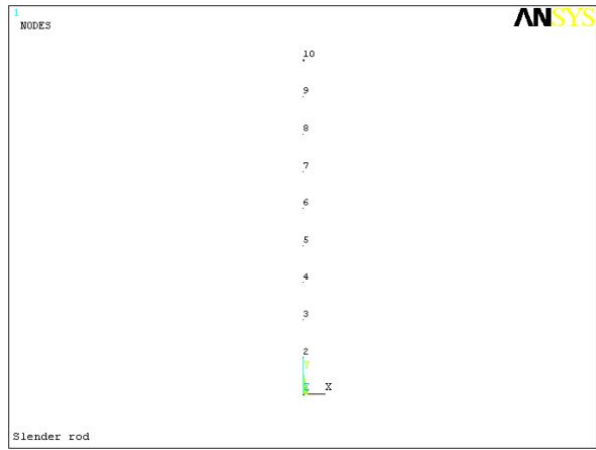


图 11.14 两个节点之间形成的单元

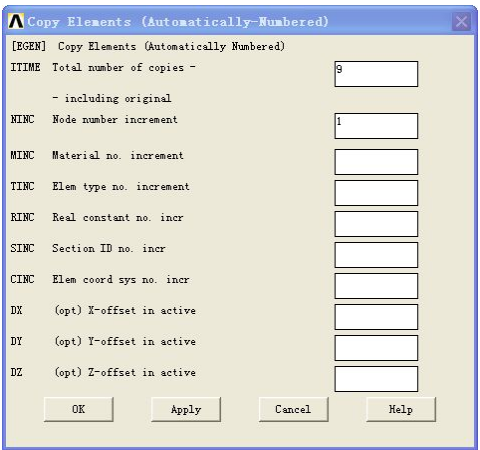


图 11.15 复制单元

step 6 选择 Utility Menu→Plot→Elements 命令，窗口将显示所生成的有限元模型，如图 11.16 所示。

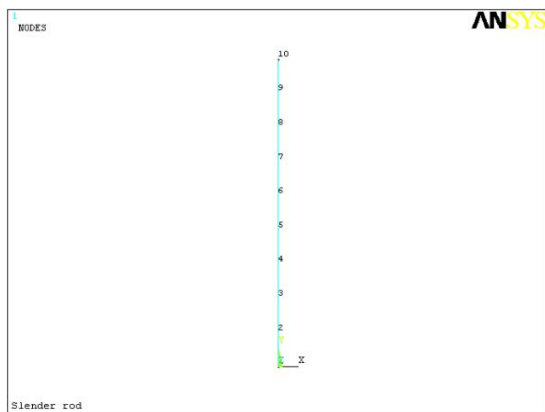


图 11.16 复制完成后的单元显示

step 7 选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as** 命令，弹出 **Save Database** 对话框，在 **Save Database to** 输入栏中输入 **Chapter11.1.db**，保存上述操作过程。

11.2.3.4 加载求解

step 1 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Static**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Sol'n Control** 命令，弹出 **Solution Controls** 对话框，参照图 11.17 对其进行参数设置，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

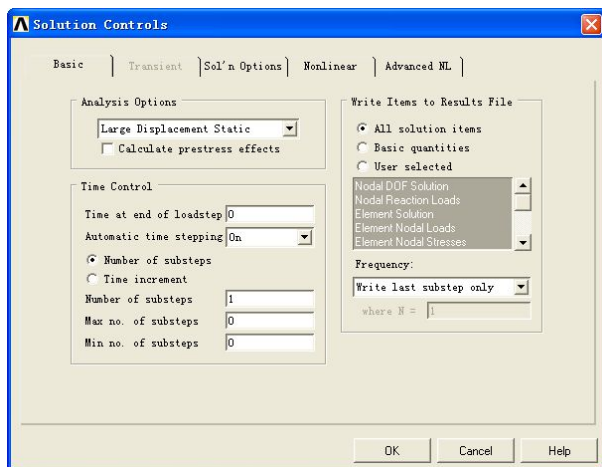


图 11.17 对求解过程进行控制

step 3 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Displacement**→**On Nodes** 命令，弹出 **Apply U, ROT on Nodes** 拾取菜单，在输入栏中输入 **1**，单击 **OK** 按钮，弹出 **Apply U, ROT on Nodes** 对话框，参照图 11.18 对其进行参数设置，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 4 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Force/Moment**→**On Nodes** 命令，弹出 **Apply F/M on Nodes** 拾取菜单，在输入栏中输入 **10**，单击 **OK** 按钮，弹出 **Apply F/M on Nodes** 对话框，参照图 11.19 对其进行参数设置。

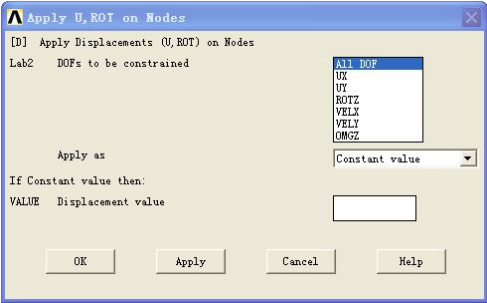


图 11.18 施加位移约束

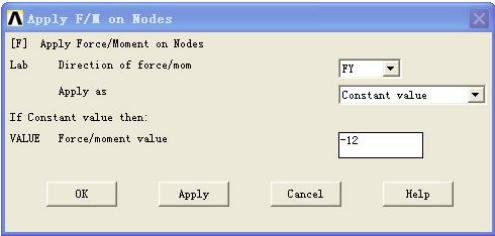


图 11.19 施加集中力约束

step 5 单击 **Apply** 按钮，弹出 **Apply F/M on Nodes** 拾取菜单，在输入栏中输入 10，单击 **OK** 按钮，弹出 **Apply F/M on Nodes** 对话框，在 **Lab Direction of force/mom** 下拉列表框中选择 **FX** 选项，在 **Apply as** 下拉列表框中选择 **Constant value** 选项，在 **VALUE Force/moment value** 输入栏中输入 0.05，单击 **OK** 按钮关闭该对话框，此时窗口将显示施加载荷及约束后的结果，如图 11.20 所示。

step 6 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Write LS File** 命令，弹出 **Write Load Step File** 对话框，在 **LSNUM Load step file number n** 输入栏中输入 1，如图 11.21 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

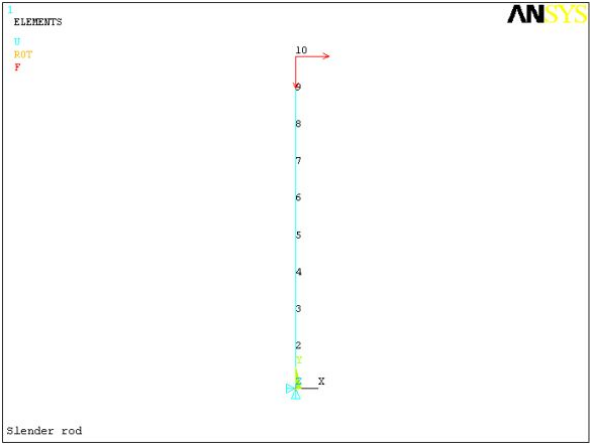


图 11.20 施加约束后的杆有限元模型



图 11.21 写入载荷步

step 7 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Force/Moment**→**On Nodes** 命令，弹出 **Apply F/M on Nodes** 拾取菜单，在输入栏中输入 10，单击 **OK** 按钮，弹出 **Apply F/M on Nodes** 对话框，在 **Lab Direction of force/mom** 下拉列表框中选择 **FY** 选项，在 **Apply as** 下拉列表框中选择 **Constant value** 选项，在 **VALUE Force/moment value** 输入栏中输入 -13。

step 8 单击 **Apply** 按钮，弹出 **Apply F/M on Nodes** 拾取菜单，在输入栏中输入 10，单击 **OK** 按

钮, 弹出 **Apply F/M on Nodes** 对话框, 在 **Lab Direction of force/mom** 下拉列表框中选择 **FX** 选项, 在 **Apply as** 下拉列表框中选择 **Constant value** 选项, 在 **VALUE Force/moment value** 输入栏中输入 **0.05**, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 9

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Write LS File** 命令, 弹出 **Write Load Step File** 对话框, 在 **LSNUM Load step file number n** 输入栏中输入 **2**, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 10

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Force/Moment**→**On Nodes** 命令, 弹出 **Apply F/M on Nodes** 拾取菜单, 在输入栏中输入 **10**, 单击 **OK** 按钮, 弹出 **Apply F/M on Nodes** 对话框, 在 **Lab Direction of force/mom** 下拉列表框中选择 **FY** 选项, 在 **Apply as** 下拉列表框中选择 **Constant value** 选项, 在 **VALUE Force/moment value** 输入栏中输入 **-14**。

step 11

单击 **Apply** 按钮, 弹出 **Apply F/M on Nodes** 拾取菜单, 在输入栏中输入 **10**, 单击 **OK** 按钮, 弹出 **Apply F/M on Nodes** 对话框, 在 **Lab Direction of force/mom** 下拉列表框中选择 **FX** 选项, 在 **Apply as** 下拉列表框中选择 **Constant value** 选项, 在 **VALUE Force/moment value** 输入栏中输入 **0.05**, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 12

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Write LS File** 命令, 弹出 **Write Load Step File** 对话框, 在 **LSNUM Load step file number n** 输入栏中输入 **3**, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 13

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**From LS Files** 命令, 弹出 **Solve Load Step Files** 对话框, 在 **LSMIN Starting LS file number** 输入栏中输入 **1**, 在 **LSMAX Ending LS file number** 输入栏中输入 **3**, 在 **LSINC File number increment** 输入栏中输入 **1**, 如图 11.22 所示, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

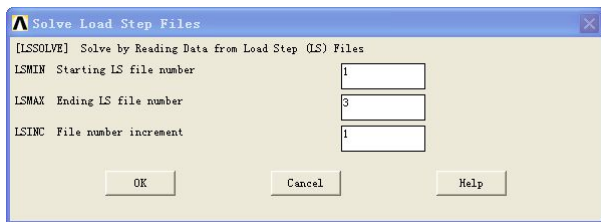


图 11.22 求解各个载荷步

step 14

求解完毕后, 弹出 **Note** 提示框, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 15

选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as** 命令, 弹出 **Save Database** 对话框, 在 **Save Database to** 输入栏中输入 **Chapter11.2.db**, 保存上述操作过程。

11.2.3.5 查看求解结果

step 1

选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Read Results**→**First Set** 命令, 读取第 **1** 个载荷步的求解结果。

step 2

选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solu** 命令, 弹出 **Contour Nodal Solution Data** 对话框, 在列表框中依次展开 **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Displacement vector sum** 选项, 并在 **Undisplaced shape key** 下拉列表框中选择 **Deformed shape with undeformed model** 选项, 如图 11.23 所示, 单击 **OK** 按钮。此

时 ANSYS 窗口将显示载荷为 12N 的杆件的变形形状，结果如图 11.24 所示。

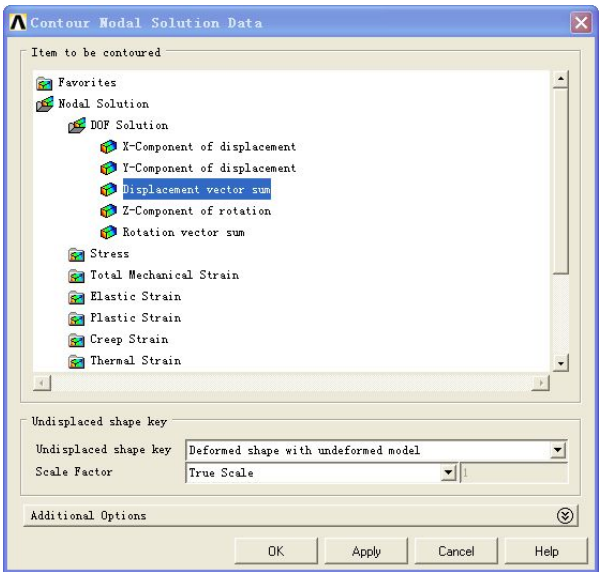


图 11.23 位移云图显示控制对话框

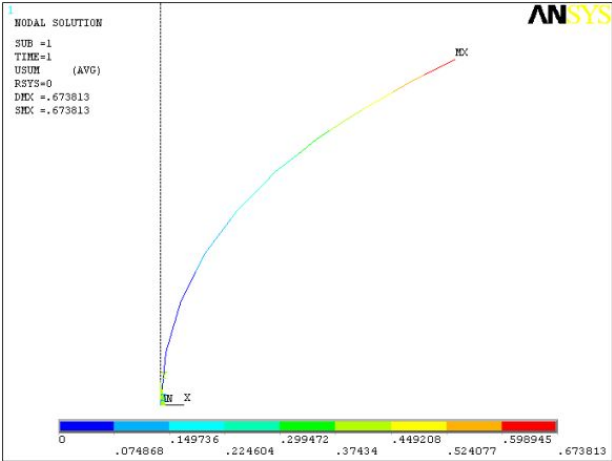


图 11.24 （载荷 1）位移云图结果显示图

step 3 选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution 命令，弹出 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，窗口将显示载荷为 12N 的杆件的节点位移，如图 11.25 所示。

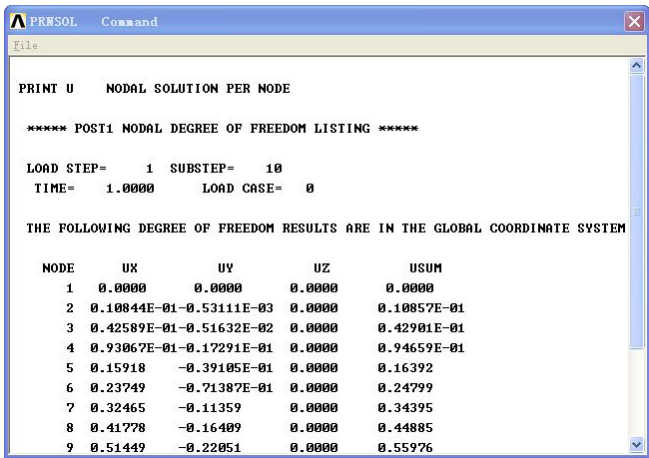


图 11.25 (载荷 1) 单元解的位移结果

- step 4** 选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→Next Set 命令，读取第 2 个载荷步的求解结果。
- step 5** 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，并在 Undisplaced shape key 下拉列表框中选择 Deformed shape with undeformed model 选项，单击 OK 按钮。此时，ANSYS 窗口将显示载荷为 13N 的杆件的变形形状，结果如图 11.26 所示。
- step 6** 选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution 命令，弹出 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，窗口将显示载荷为 13N 的杆件的节点位移，如图 11.27 所示。

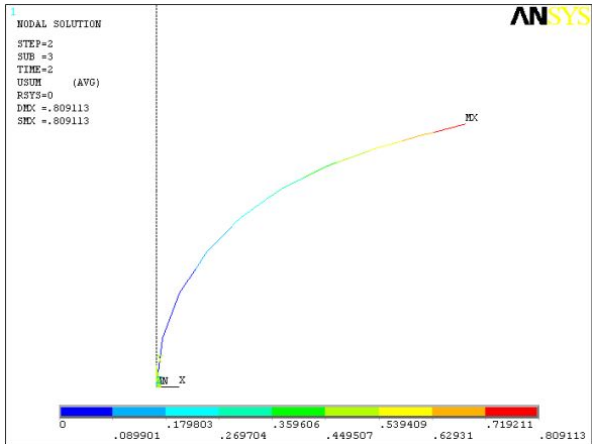


图 11.26 (载荷 2) 位移云图结果显示图

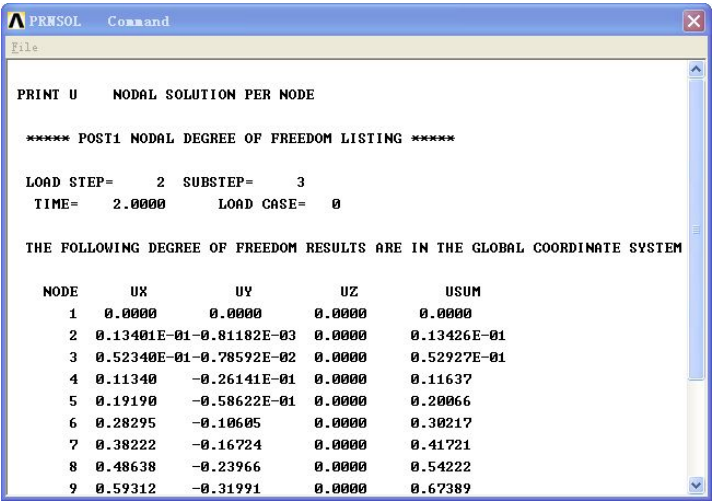


图 11.27 （载荷 2）单元解的位移结果

- step 7** 选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 命令，读取第 3 个载荷步的求解结果。
- step 8** 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，并在 Undisplaced shape key 下拉列表框中选择 Deformed shape with undeformed model 选项，单击 OK 按钮。此时，ANSYS 窗口将显示载荷为 14N 的杆件的变形形状，结果如图 11.28 所示。
- step 9** 选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution 命令，弹出 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，窗口将显示载荷为 14N 的杆件的节点位移，如图 11.29 所示。
- step 10** 选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit→No Save 命令，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

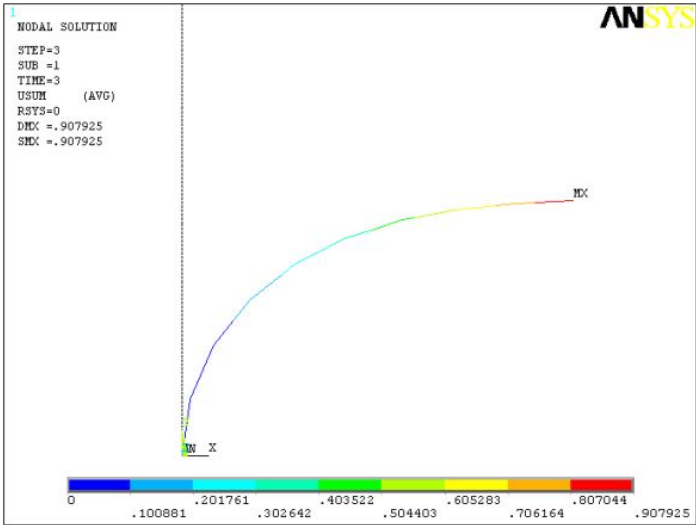


图 11.28 (载荷 3) 位移云图结果显示图

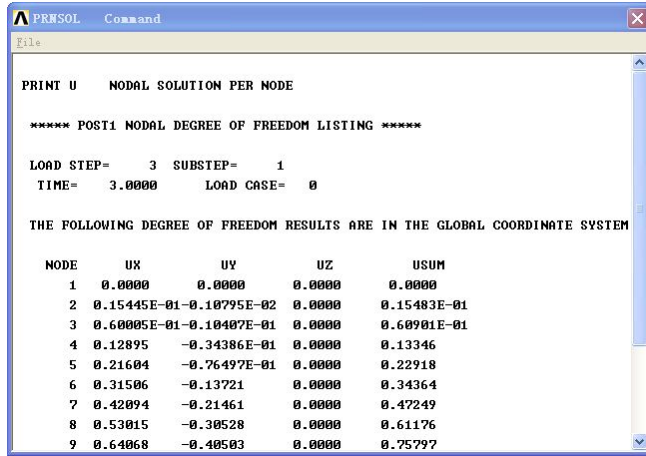


图 11.29 (载荷 3) 单元解的位移结果

11.2.4 命令流

```

/PREP7
ET,1,BEAM23
*SET,B,0.005
*SET,H,0.005
*SET,A,B*H
*SET,L,1
*SET,I,B*H**3/12
R,1,A,I,H,
MPTEMP
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,8e10
MPDATA,PRXY,1,,0.3
N,1,0,0
N,10,0,L,0
FILL,1,10,8,,1,1,1,
FLST,2,2,1
FITEM,2,1
FITEM,2,2
E,P51X
FLST,4,1,2,ORDE,1
FITEM,4,1
EGEN,9,1,P51X
FINISH
/SOL
ANTYPE,0
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,1,0,0
AUTOTS,1
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,1
D,P51X,ALL
FLST,2,1,1,ORDE,1

```

```
FITEM,2,10
F,P51X,FY,-12
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,10
F,P51X,FX,0.05
LSWRITE,1,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,10
F,P51X,FX,0.05
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,10
F,P51X,FY,-13
LSWRITE,2,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,10
F,P51X,FY,-14
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,10
F,P51X,FX,0.05
LSWRITE,3,
LSSOLVE,1,3,1,
SAVE
FINISH
/POST1
PLDISP,1
FINISH
! /EXIT,NOSAV
```

11.3 材料非线性有限元分析实例详解：橡胶圆筒受压分析

本节介绍橡胶圆筒受压分析中的材料非线性分析的 ANSYS 操作基本过程。

11.3.1 问题描述

有一无限长橡胶圆筒，其横截面形状如图 11.30 所示，圆筒由 Mooney-Rivlin 材料构成，在其内壁面承受均布压力载荷 P 的作用，求圆筒的应力和位移响应，材料参数如表 11.2 所示。

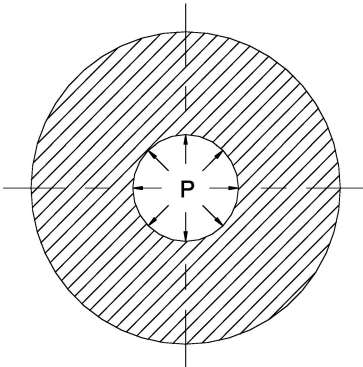


图 11.30 几何模型

几何参数：
外径 $R_1=20\text{mm}$ ；内径 $R_2=5\text{mm}$ 。
载荷为 80Mpa 。

表 11.2 材料参数表

$T_1/^\circ\text{C}$	A_1/Mpa	B_1/Mpa	$T_2/^\circ\text{C}$	A_2/Mpa	B_2/Mpa	PRXY
20	40	10	40	120	30	0.5

11.3.2 问题分析

考虑到圆筒的无限长特性，忽略其端面效应，按平面应变问题进行分析；同时根据对称性，选取圆筒横截面的 $1/4$ 建立几何模型，并选择 **PLANE182** 单元进行求解。在建模过程中，长度单位采用 **mm**，应力单位采用 **Mpa**。

11.3.3 求解步骤

11.3.3.1 定义工作目录及文件名

- step 1
- 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 11\11-2，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter11-2。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。
- step 2
- 选择 Utility Menu→File→Change Title 命令，弹出 Change Title 对话框，在输入栏中输入 Rubber cylinder，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11.3.3.2 定义单元类型

- step 1
- 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid 中的 Quad 4node182 选项，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 11.31 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

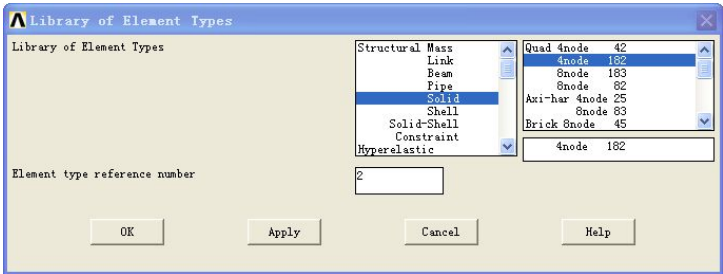


图 11.31 选择单元类型对话框

- step 2
- 单击 Element Types 对话框中的 Options 按钮，弹出 PLANE182 element type options 对话框，在 Element behavior K3 下拉列表框中选择 Plane strain 选项，如图 11.32 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

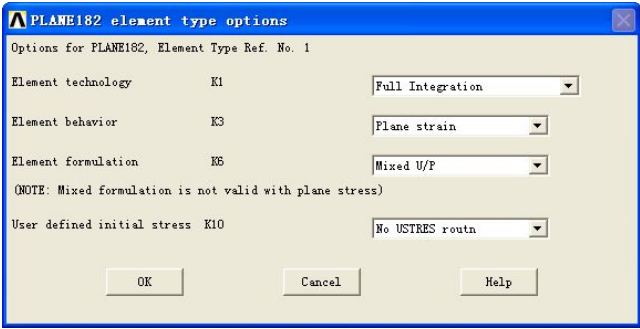


图 11.32 PLANE182 element type options 对话框

step 3 单击 **Element Types** 对话框中的 **Close** 按钮，关闭该对话框。

11.3.3.3 定义材料性能参数

step 1 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models** 命令，弹出 **Define Material Model Behavior** 对话框。

step 2 在 **Material Models Available** 栏中依次展开 **Structure**→**Linear**→**Elastic**→**Isotropic** 选项，弹出 **Linear Isotropic Properties for Material Number1** 对话框，在 **PRXY** 输入栏中输入 0.5，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 3 在 **Material Models Available** 栏中依次展开 **Structure**→**Nonlinear**→**Elastic**→**Hyperelastic**→**Mooney-Rivlin**→**2parameters** 选项，弹出 **Hyper-Elastic Table** 对话框，单击 **Add Temperature** 按钮，参照图 11.33 对其进行参数设置，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 4 在 **Define Material Model Behavior** 对话框中选择 **Material**→**Exit** 命令，关闭该对话框。

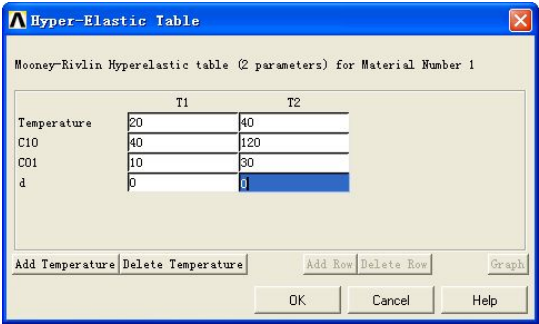


图 11.33 Hyper-Elastic Table 对话框

11.3.3.4 创建几何模型、划分网格

step 1 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Areas**→**Circle**→**Partial Annulus** 命令，弹出 **Part Annular Circ Area** 对话框，在 **Rad-1** 输入栏中输入 5，在 **Theta-1** 输入栏中输入 0，在 **Rad-2** 输入栏中输入 20，在 **Theta-2** 输入栏中输入 90，如图 11.34 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

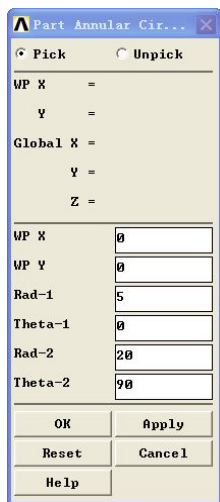


图 11.34 Part Annular Circ Area 对话框

step 2 选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Number** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，选中 **LINE line Numbers** 复选框，使其状态从 **Off** 变为 **On**，其余选项采用默认设置，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 3 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**ManualSize**→**Lines**→**picked Lines** 命令，弹出 **Element Size on** 拾取菜单，在输入栏中输入 1、3，单击 **OK** 按钮，弹出 **Element Size on Picked Lines** 对话框，在 **NDIV No.of element divisions** 输入栏中输入 10，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 4 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**ManualSize**→**Lines**→**picked Lines** 命令，弹出 **Element Size on** 拾取菜单，在输入栏中输入 2、4，单击 **OK** 按钮，弹出 **Element Size on Picked Lines** 对话框，在 **NDIV No.of element divisions** 输入栏中输入 16，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 5 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Areas**→**Free** 命令，弹出 **Mesh Areas** 拾取菜单，单击 **Pick All** 按钮关闭该菜单。

step 6 选择 **Utility Menu**→**Plot**→**Elements** 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 11.35 所示。

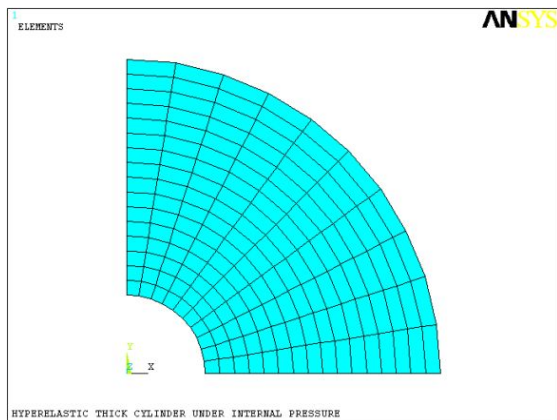


图 11.35 网格划分结果



step 7

选择 Utility Menu→Select→Everything 命令，选择所有实体。

step 8

选择 Utility Menu→File→Save as 命令，弹出 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 Rubber cylinder1，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11.3.3.5 加载求解

step 1

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Control 命令，弹出 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，参照图 11.36 对其进行参数设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

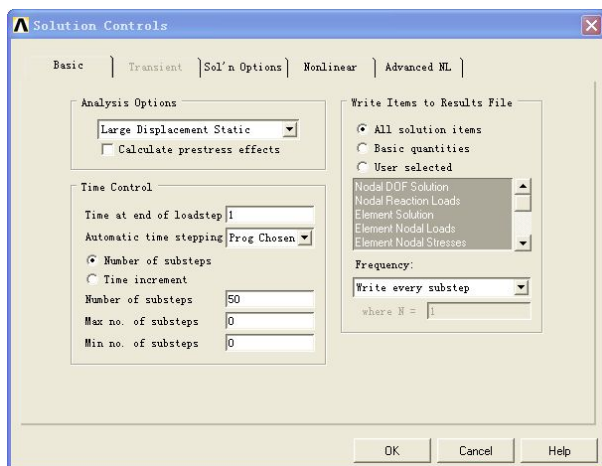


图 11.36 Solution Controls 对话框

step 3

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→Uniform Temp 命令，弹出 Uniform Temperature 对话框，在 [TUNIF] Uniform temperature 输入栏中输入 30，如图 11.37 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

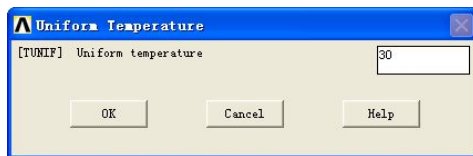


图 11.37 Uniform Temperature 对话框



该操作为施加均匀温度载荷。

step 4

选择 Utility Menu→Select→Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，在第一个下拉列表框中选择 Lines 选项，其余选项采用默认设置，如图 11.38 所示，单击 Apply 按钮，弹出 Select lines 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 5

选择 Utility Menu→Select→Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，参照图 11.39 对其进行参数设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。





图 11.38 Select Entities 对话框

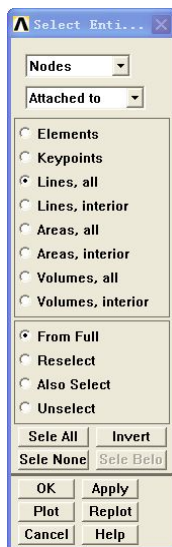


图 11.39 Select Entities 对话框



步骤 4 和步骤 5 的操作为选择编号为 L2 的线段上的所有节点。

step 6

选择 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Nodes 命令，弹出 Apply U, ROT on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX 选项，在 Apply as 下拉列表框中选择 Constant value 选项，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框，结果如图 11.40 所示。

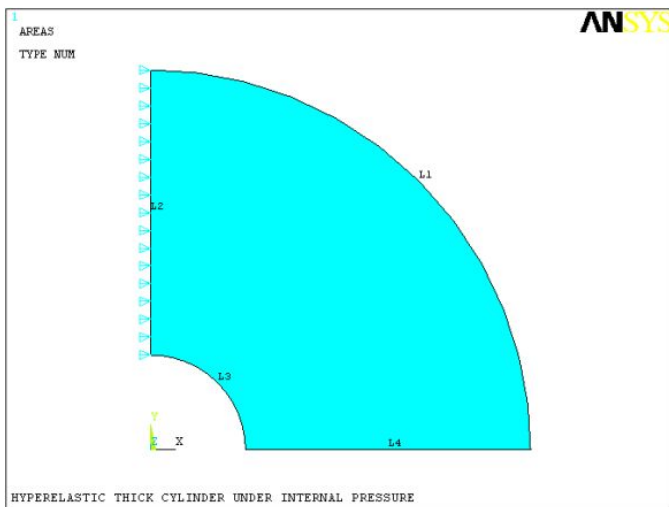


图 11.40 施加位移约束后的结果

step 7

选择 Utility Menu → Select → Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，在第一个下拉列表框中选择 Lines 选项，其余选项采用默认设置，单击 Apply 按钮，弹出 Select lines 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该对话框。



step 8 选择 **Utility Menu→Select→Entities** 命令, 弹出 **Select Entities** 对话框, 参照图 11.38 和图 11.39 对其进行参数设置, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。



步骤 7 和步骤 8 的操作是选择编号为 L4 的线段上的所有节点。

step 9 选择 **Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes** 命令, 弹出 **Apply U, ROT on Nodes** 拾取菜单, 单击 **Pick All** 按钮, 弹出 **Apply U, ROT on Nodes** 对话框, 在 **Lab2 DOFs to be constrained** 列表框中选择 **UY** 选项, 在 **Apply as** 下拉列表框中选择 **Constant value** 选项, 在 **VALUE Displacement value** 输入栏中输入 0, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 10 选择 **Utility Menu→Select→Entities** 命令, 弹出 **Select Entities** 对话框, 在第一个下拉列表框中选择 **Lines** 选项, 其余选项采用默认设置, 单击 **Apply** 按钮, 弹出 **Select lines** 拾取菜单, 在输入栏中输入 3, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。



步骤 9 和步骤 10 的操作是选择编号为 L3 的线段上的所有节点。

step 11 选择 **Utility Menu→Select→Entities** 命令, 弹出 **Select Entities** 对话框, 参照图 11.38 和图 11.39 对其进行参数设置, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 12 选择 **Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Nodes** 命令, 弹出 **Apply PRES on Nodes** 拾取菜单, 单击 **Pick All** 按钮, 弹出 **Apply PRES on Nodes** 对话框, 在 **VALUE Load PRES value** 输入栏中输入 80, 单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 13 选择 **Utility Menu→Select→Everything** 命令, 选择所有实体。



该操作为选择所有实体, 不能省略, 否则将有部分单元和节点不参与计算。

step 14 选择 **Main Menu→Solution→Solve→Current LS** 命令, 弹出 **Solve Current Load Step** 对话框, 如图 11.41 所示, 单击 **OK** 按钮, ANSYS 开始求解计算。

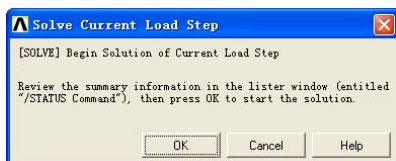


图 11.41 Solve Current Load Step 对话框

step 15 求解结束时, 弹出 **Note** 对话框, 单击 **Close** 按钮关闭该对话框。

step 16 选择 **Utility Menu→File→Save as Jobname.db** 命令, 保存上述操作。

11.3.3.6 查看求解结果

step 1 选择 **Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set** 命令, 读取最后一个载荷步的求解结果。

step 2

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undeformed 单选按钮，如图 11.42 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后和未变形的几何形状，如图 11.43 所示。

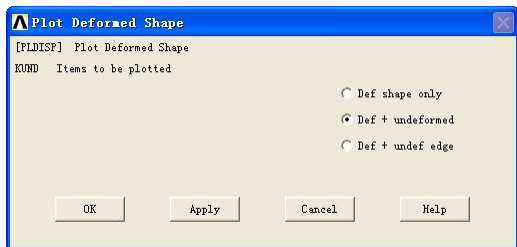


图 11.42 Plot Deformed Shape 对话框

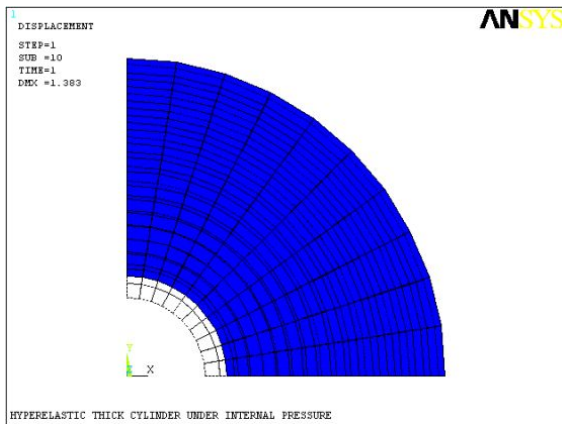


图 11.43 变形后和未变形的几何形状

step 3

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，其余选项采用默认设置，如图 11.44 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 11.45 所示的位移场分布等值线图。

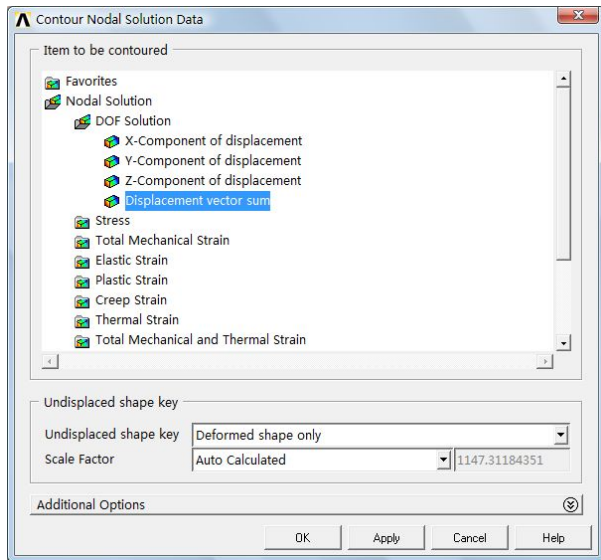


图 11.44 Contour Nodal Solution Data 对话框

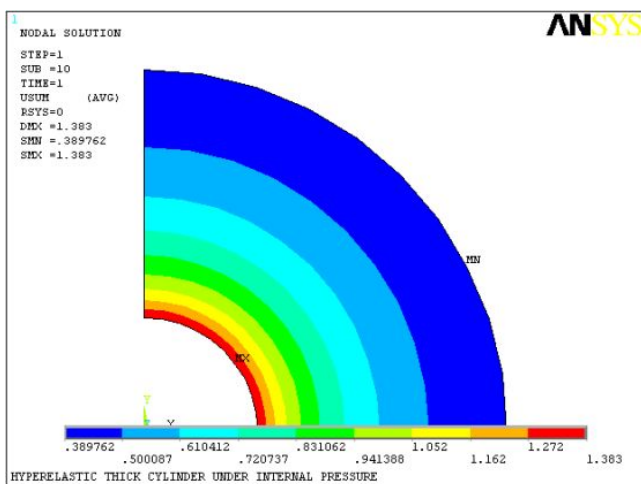


图 11.45 位移场分布等值线图

step 4

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→Stress→von Mises stress 选项，其余选项采用默认设置，如图 11.46 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 11.47 所示的 Mises 等效应力场分布等值线图。

step 5

选择 Utility Menu→Select→Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，在第一个下拉列表框中选择 Nodes 选项，在第二个下拉列表框中选择 By Location 选项，选择 Y coordinates 单选按钮，在 Min, Max 输入栏中输入 0，选择 From Full 单选按钮，如图 11.48 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



该操作为选择x轴上的节点。

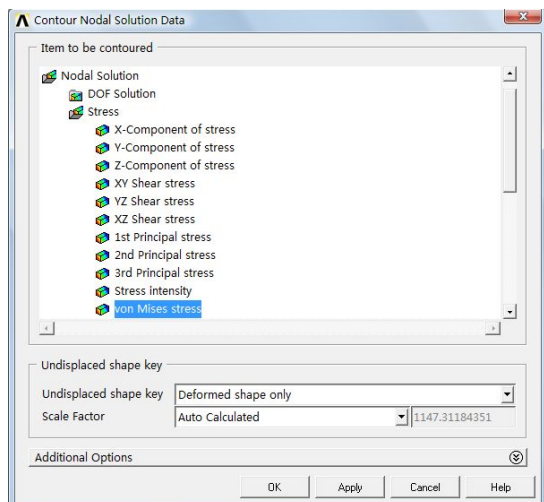


图 11.46 Contour Nodal Solution Data 对话框

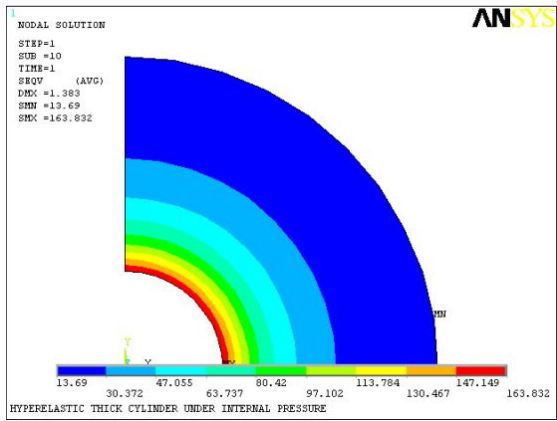


图 11.47 Mises 等效应力场分布等值线图

step 6 选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution 命令，弹出 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，窗口将显示 X 轴上所有节点的位移结果，如图 11.49 所示。

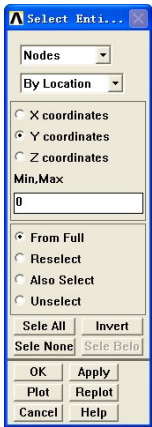


图 11.48 Select Entities 对话框

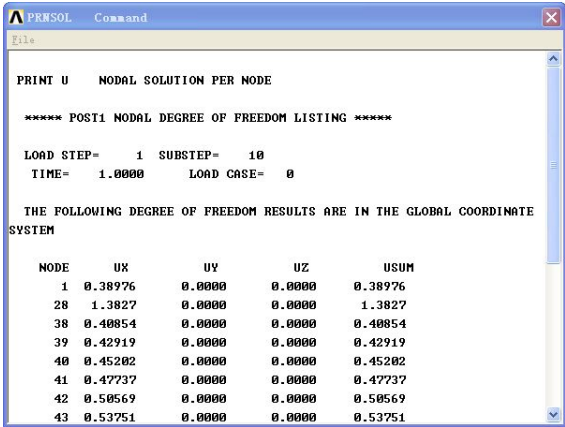


图 11.49 X 轴上节点的位移结果

step 7 选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit→No Save 命令，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

11.3.4 命令流

```
/PREP7
ET,1,PLANE182
KEYOPT,1,3,2
MP,PRXY,1,,0.5
TB,HYPE,1,2,2,MOONEY
TBTEMP,20
TBDATA,1,40,10
TBTEMP,40
TBDATA,1,120,30,0,,,
CYL4, , ,5,0,20,90
/PNUM,LINE,1
LSEL, S, , ,1,3,2
```



```
LESIZE,ALL, , ,10
LSEL, S, , ,2,4,2
LESIZE,ALL, , ,16
AMESH,1
FINISH
/SOL
ANTYPE,STATIC
NLGEOM,ON
NSUBST,50
TIME,1
BTUNIF,TEMP,30,
LSEL,S, , , 2
NSLL,S,1
D,ALL, UX
LSEL,S, , , 4
NSLL,S,1
D,ALL,UY
LSEL,S, , , 3
NSLL,S,1
SF,ALL,PRES,80
ALLSEL
SOLVE
FINISH
/POST1
SET, LAST
PLDISP,1
PLNSOL, U,SUM
PLNSOL, S,EQV
NSEL,S,LOC,Y,0
PRNSOL,U,COMP
FINISH
/EXIT,ALL
```

11.4 小结

非线性问题是工程实践中的重要问题，非线性问题主要分为三大类：几何非线性、材料非线性和状态非线性。这三种结构非线性在日常生活中有很多实际的应用和体现，所以掌握非线性分析对解决结构问题至关重要。本章对几何非线性和材料非线性提供了实例，读者可以根据实例进行非线性分析的学习。同时，要精通 ANSYS 结构非线性的分析，还要对 ANSYS 静力学、动力学以及热力学有一定的了解，希望读者不要忽视其他方面的学习。



第 12 章 ANSYS 结构稳定性分析

本章包括

- ◆ 结构稳定性有限元计算基本概念
- ◆ 实例详解 1：悬臂梁受压特征值屈曲分析
- ◆ 实例详解 2：复合材料圆柱壳非线性屈曲分析

结构稳定性问题是结构分析和设计中的重要研究课题。本章从结构稳定性有限元计算的基本概念出发，结合相关分析实例，对 ANSYS 结构稳定性分析的基本实现方法和操作步骤进行系统的介绍。

12.1 结构稳定性分析的基本概念

结构在外载作用下（产生压应力或剪应力时）突然失去原有形状的现象称为屈曲失稳。失稳破坏常在强度足够的情况下突然发生，是机械、建筑、航空航天等诸多工程领域中结构发生破坏的一种重要形式。

当前，稳定性分析（又称屈曲分析）已成为许多结构设计中必须考虑的关键性问题。在 ANSYS 中，稳定分析分为两类：特征值屈曲分析和非线性屈曲分析。

12.1.1 特征值屈曲分析

特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度（分叉点）。该方法相当于教科书里的弹性屈曲分析方法。例如，一个柱体结构的特征值屈曲分析的结果，将与经典欧拉解相当。但是，初始缺陷和非线性使得很多实际结构都不是在其理论弹性屈曲强度处发生屈曲。因此，特征值屈曲分析经常得出非保守结果，通常不能用于实际的工程分析。

特征值屈曲分析考虑了应力刚化效应，这种效应会导致结构在承受压应力后抵抗横向载荷能力降低，当压应力增加时，结构抵抗横向能力减弱。在某一载荷水平下，这种负的应力刚度超过线性结构刚度，造成结构屈曲。屈曲发生的点称为分叉点（如图 12.1 所示），由于力—变形曲线达到该点后可能沿两条不同途径前进，所以当超过分叉点时，结构将屈曲或者在不稳定状态下承受载荷。

ANSYS 的线性屈曲分析使用特征值的公式计算造成结构负刚度的应力刚度矩阵的比例因子。

$$([K] + \lambda[S])\{\psi\} = 0 \quad (12-1)$$

其中，[K]为刚度矩阵，[S]为应力刚度矩阵，{ψ}为位移特征矢量，λ为特征值（也叫比例因子

或载荷因子)，利用上面的特征值公式可以决定结构的分叉点。

12.1.2 非线性屈曲分析

要精确地确定屈曲载荷，应该使用非线性屈曲分析。非线性屈曲分析是在大变形效应开关打开的情况下（[NLGEOM, ON]）的一种静力分析，该分析过程一直进行到结构的极限载荷或最大载荷为止。其他诸如塑性等非线性也可以包括在分析中。非线性屈曲分析中得出的极限载荷通常比线性屈曲分析确定的分叉点低（如图 12.1 所示）。这是由于非线性屈曲能考虑真实结构中存在的初始缺陷，以及几何和材料的各种非线性。ANSYS 程序在大变形分析中是采用把弧长法和 Newton—Raphson 法结合起来修正结构单元的方法，该方法用一种逐渐增加载荷的非线性静力分析技术来求得使结构开始变得不稳定时的临界载荷。当单独使用增量 Newton—Raphson 法时，刚度矩阵可能会变成奇异矩阵。弧长法使 Newton—Raphson 平衡迭代沿一条弧收敛到其平衡路径。因此，可避免矩阵在那些奇异点处变为奇异矩阵，并控制收敛性。非线性屈曲是施加缺陷之后计算的结果，临界载荷比线性屈曲载荷要低，因此，线性屈曲载荷可以作为非线性屈曲分析的给定载荷，在渐进加载达到此载荷前，非线性求解收敛。

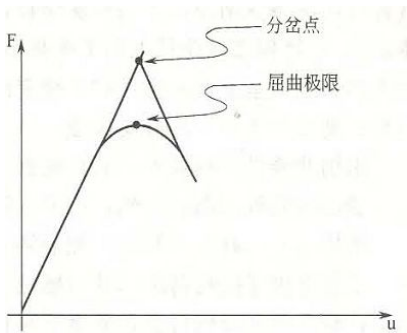


图 12.1 屈曲曲线

12.2 实例详解 1：悬臂梁受压线性屈曲分析

本节介绍在 ANSYS 中梁结构的横向弯扭失稳问题的分析方法，并通过计算确定梁发生失稳时的临界载荷。

12.2.1 问题描述与分析

如图 12.2 所示为某等截面 T 型悬臂梁结构，其自由端受到单位横向载荷 $F=1\text{N}$ 作用。结构基本参数：杨氏弹性模量 $E=71.7\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.33$ ，梁长 $L=1\text{m}$ ，宽度 $B=0.03\text{m}$ ，高度 $H=0.021\text{m}$ ，腹板厚 $t_1=0.01\text{m}$ ，翼缘厚 $t_2=0.003\text{m}$ 。

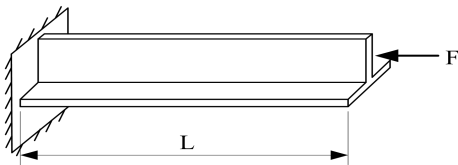


图 12.2 T 型梁结构示意图

选择三维梁单元 **BEAM189** 来划分网格，为描述屈曲模态，沿梁长度方向取 10 个主自由度。

12.2.2 求解过程（GUI 方法）

12.2.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，如图 12.3 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，单击 Browse 按钮选择工作目录：E:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 12\12-1，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter12-1。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

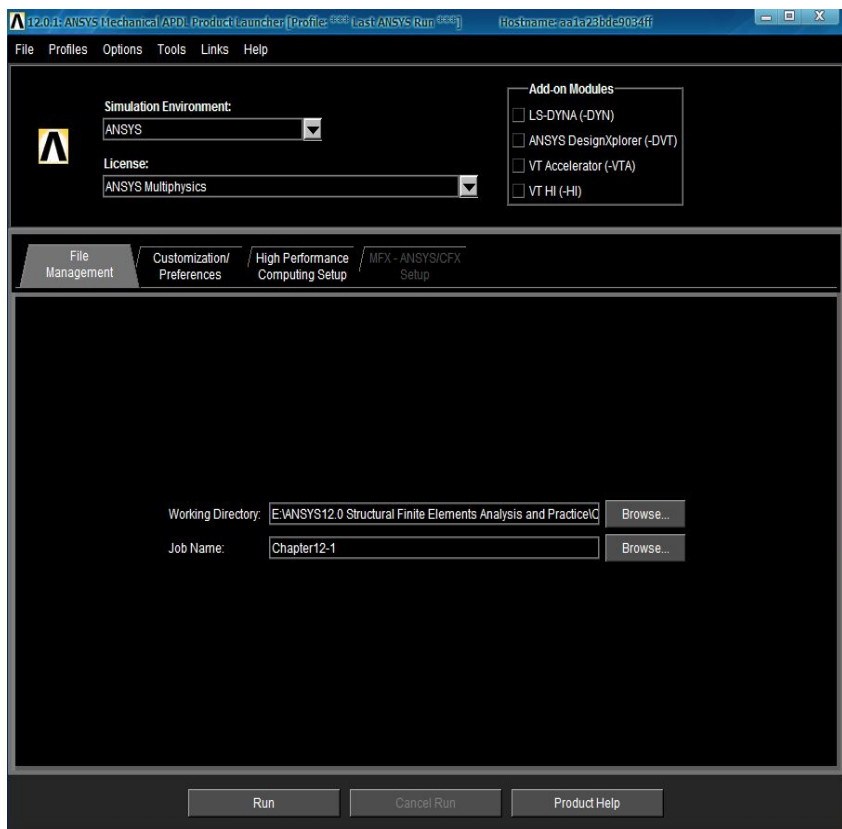


图 12.3 ANSYS 起始窗口

12.2.2.2 定义单元和材料属性

step 1 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，如图 12.4 所示，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 定义单元类型。选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid 中的 3 node 189 单元，

如图 12.5 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框，单击 **Close** 按钮关闭 **Element Types** 对话框。

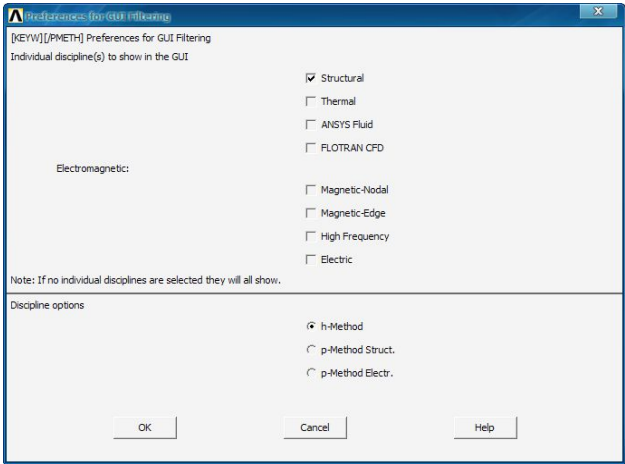


图 12.4 Preferences for GUI Filtering 对话框

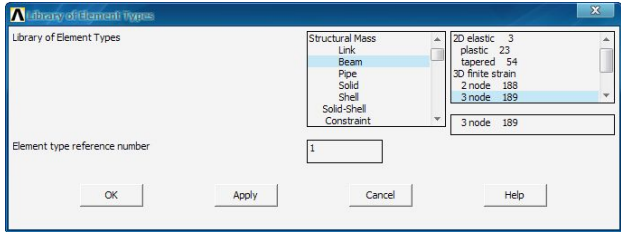


图 12.5 Library of Element Types 对话框

step 3 定义单元截面。选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Sections**→**Beam**→**Common Sects** 命令，弹出 **Beam Tool** 对话框，在对话框中输入截面的各种参数，如图 12.6 所示，单击 **Apply** 按钮接受截面参数设置。单击 **Preview** 按钮，可以观察到已经定义的截面形状，如图 12.7 所示。图的右侧显示了程序自动计算的梁截面的几何参数，包括面积、惯性矩、重心以及剪切中心位置等。单击 **Meshview** 按钮，显示截面网格，如图 12.8 所示。完成截面的定义后，单击 **OK** 按钮退出该对话框。

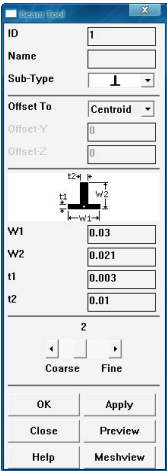


图 12.6 Beam Tool 对话框

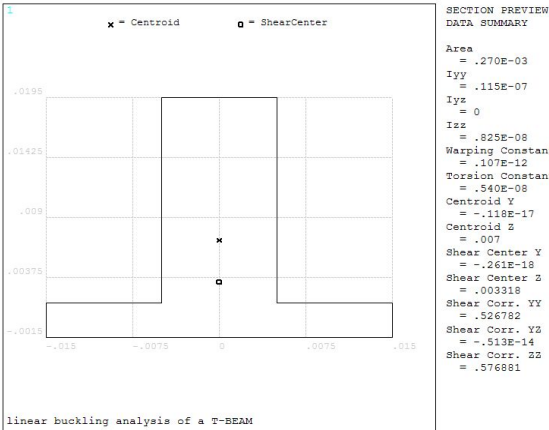


图 12.7 截面形状示意图

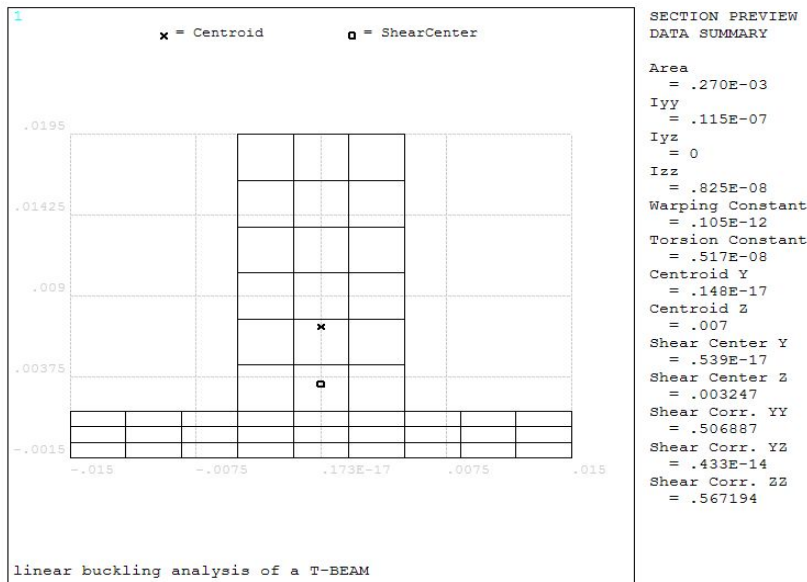


图 12.8 截面网格示意图

step 4

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，如图 12.9 所示，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 7.17e10，在 PRXY 输入栏中输入 0.33，如图 12.10 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

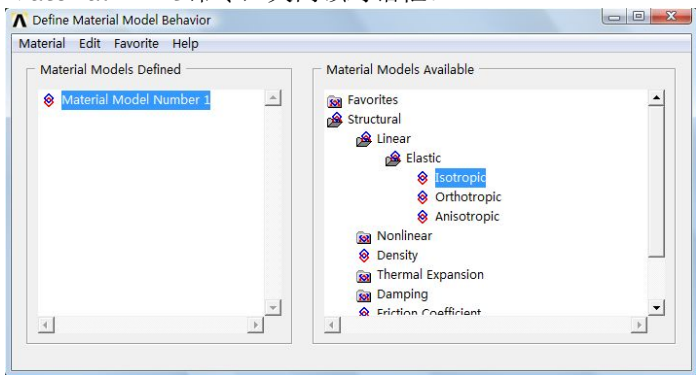


图 12.9 Define Material Model Behavior 对话框

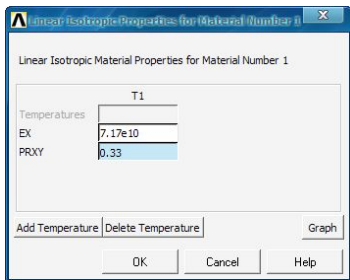


图 12.10 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框



特征值屈曲为线弹性，定义的材料非线性将被忽略。

step 5 选择 **Utility Menu→File→Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。



也可单击 按钮或 **SAVE_DB** 按钮来实现保存操作。

12.2.2.3 建立关键点和直线

step 1 选择 **Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoint→In Active CS** 命令，定义表 12.1 所列的关键点，结果如图 12.11 所示。

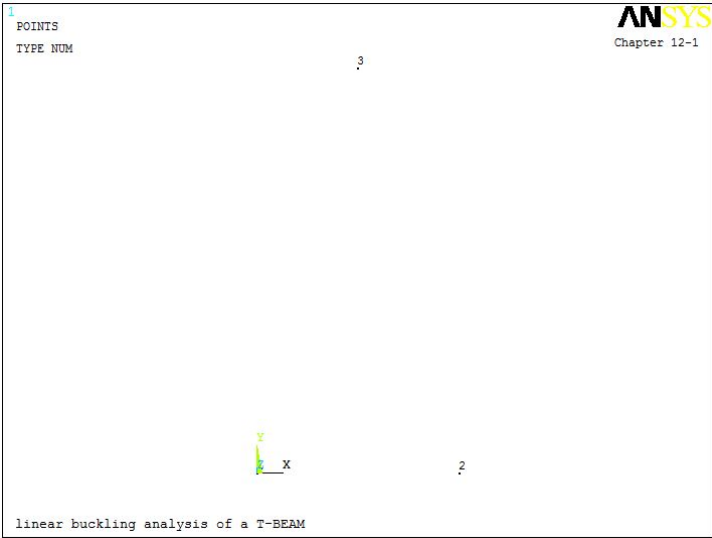


图 12.11 建立关键点后的结果

step 2 选择 **Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Create Lines→Lines→Straight Line** 命令，在弹出的窗口的图形显示区域依次选择 1 号、2 号关键点（参见表 12.1），单击 **OK** 按钮，即可在关键点 1 和 2 之间建立一条直线，如图 12.12 所示。

表 12.1 关键点的编号与坐标

关键点 ID	X	Y	Z
1	0	0	0
2	0.5	0	0
3	0.25	1	0

12.2.2.4 划分网格

step 1 选择 **Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Lines** 命令，弹出 **Line Attributes** 拾取菜单。在图形选择区域选择刚定义的直线，单击拾取菜单的 **Apply** 按钮，弹出 **Line Attributes** 对话框，参数设置如图 12.13 所示。单击 **OK** 按钮，在弹出的 **Line Attributes** 对话框中选择关键点 3，单击 **OK** 按钮完成设置。

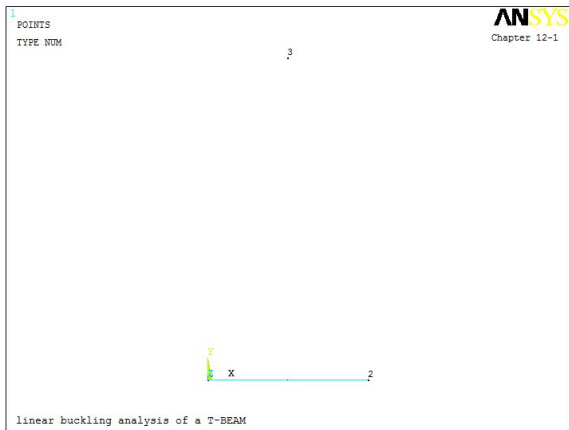


图 12.12 建立线后的结果

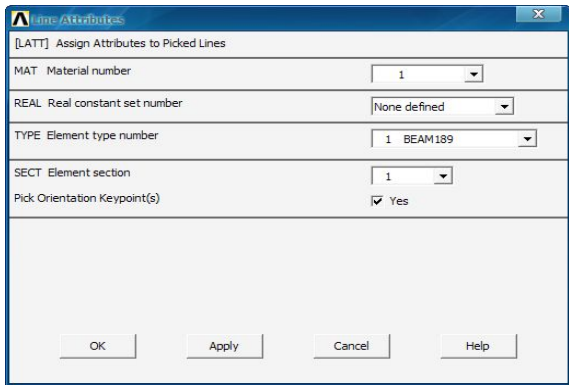


图 12.13 Line Attributes 对话框

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→Manual Size→Lines→All Lines 命令，在弹出的对话框中的 NVIDIA No. of element divisions 栏中输入 10，如图 12.14 所示，单击 OK 按钮退出。

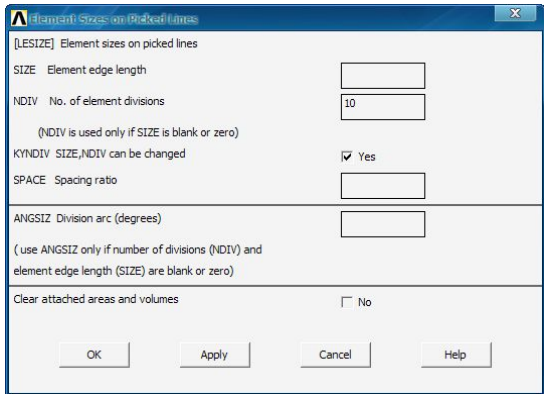


图 12.14 Element Sizes on Picked Lines 对话框

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 命令，弹出 MeshTool 对话框。单击 Mesh 按钮，弹出 Mesh Line picker 对象拾取菜单，在图形选择区域选择所定义的直线，单击拾取菜单中的 OK 按钮，完成单元划分。单击 MeshTool 对话框中的 Close 按钮，退出该对话框。



该步骤是在进行单元尺寸控制之后进行自由网格划分。

选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Pan Zoom Rotate** 命令,打开 **Pan-Zoom-Rotate** 对话框,设置视图格式为 **Iso**。选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Style**→**Size and Shape** 命令,在弹出窗口的 **[/ESHAPE]** 栏中选中 **On** 复选框,单击 **OK** 按钮,即可看到梁截面的实际形状,如图 12.15 所示。

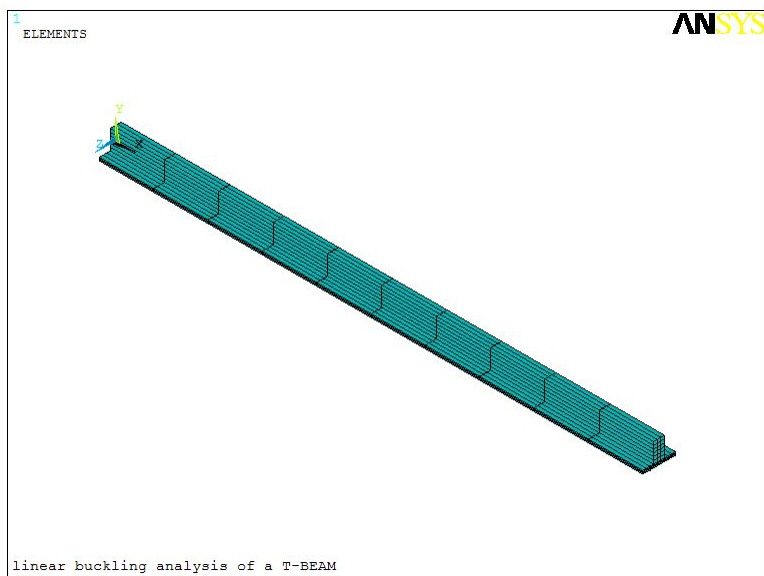


图 12.15 梁的实际形状图

12.2.2.5 施加边界条件和载荷

step 1

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Displacement**→**On Keypoints** 命令,弹出 **Apply U,ROT on KPs** 拾取菜单,直接在文本框中输入 1 并按 **Enter** 键,在随后弹出的 **Apply U,ROT on KPs** 对话框中选择约束所有的自由度,即选择 **All DOF** 选项,如图 12.16 所示,单击 **OK** 按钮完成固定端的位移约束。

step 2

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Force/Moment**→**On Keypoints** 命令,弹出 **Apply F/M on KPs** 拾取菜单,直接在文本框中输入 2 并按 **Enter** 键,在随后弹出的 **Apply F/M on KPs** 对话框中选择 **FX** 选项,集中力的 **Value** 设为 -1,如图 12.17 所示,单击 **OK** 按钮完成加载。



该操作为对梁施加载荷,负值表示受压。

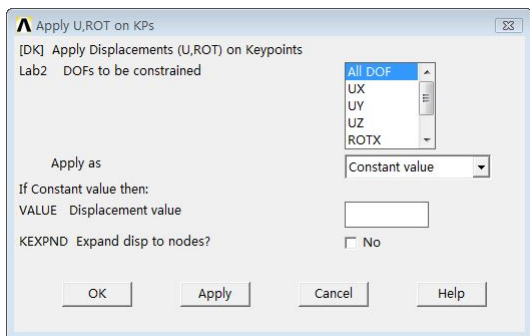


图 12.16 Apply U,ROT on KPs 对话框

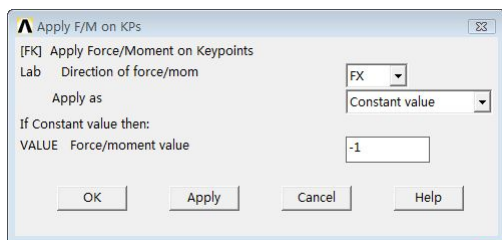


图 12.17 Apply F/M on KPs 对话框

12.2.2.6 求解静力分析

step 1

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，单击 **OK** 按钮接受默认的静力分析选项。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Sol'n Controls** 命令，弹出 **Solution Controls** 对话框，选中 **Calculate prestress effects** 复选框，如图 12.18 所示，单击 **OK** 按钮退出该对话框。

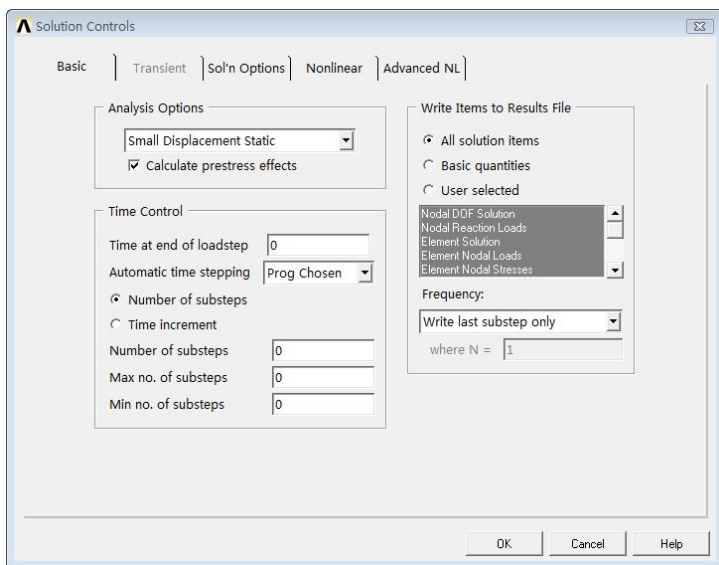


图 12.18 Solution Controls 对话框

step 2

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve-current LS** 命令，在弹出的对话框中单击 **OK** 按钮开始求解。认真检查状态窗口的信息，在求解完成后，单击 **Close** 按钮关闭窗口。

**step 3**

选择 Main Menu→Finish 命令，暂时退出求解器，向程序表明静力分析已经完成。

12.2.2.7 求解屈曲分析

step 1

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，选择分析类型为 Eigen Buckling，然后单击 OK 按钮。选择 Main Menu→Solution→Analysis Options 命令，弹出分析选项对话框，选择 Block Lanczos 选项，设置抽取的模态数为 1，单击 OK 按钮。选择 Main Menu→Solution→Load Step opts-Expansion pass→Expand Modes 命令，设置扩展的模态数为 1，然后单击 OK 按钮关闭该对话框。



对于结构失稳，第一个模态是最重要的， $n=1, n+1$ 的模态没有太多实际意义。

step 2

选择 Main Menu→Solution→Solve-Current LS，认真检查状态窗口的信息，然后将其关闭；在 Solve Current Load Step 对话框中，单击 OK 按钮开始求解，求解完成后，单击 Close 按钮关闭该对话框。

12.2.2.8 查看求解结果

step 1

选择 Main Menu→Finish 命令，暂时退出求解器，向程序表明特征值屈曲分析已经完成。

step 2

选择 Main Menu→General Postproc→Read Results- First Set 命令，选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框。在该对话框中选择 Def + undeformed 单选按钮，然后单击 OK 按钮。此时，在图形窗口中出现变形前后的图形，如图 12.19 所示。

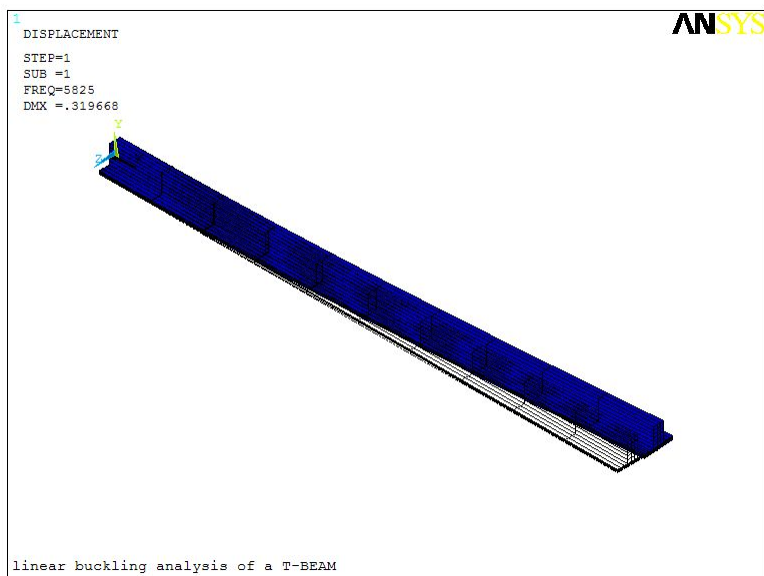


图 12.19 梁的第一阶屈曲模态图



12.2.2.9 退出 ANSYS

step 1

选择 **Utility Menu**→**File**→**Exit** 命令,弹出 **Exit from ANSYS** 对话框,选择 **Save Everything** 单选按钮,如图 12.20 所示,单击 **OK** 按钮,关闭 ANSYS 程序。

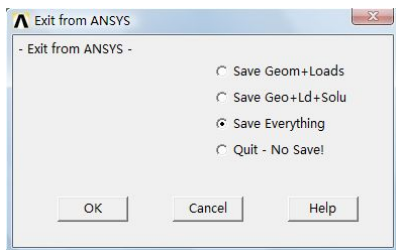


图 12.20 Exit from ANSYS 对话框

12.2.3 命令流

```

/TITLE, linear buckling analysis of a T-BEAM
/PREP7
ET,1,BEAM189
!*
SECTYPE, 1, BEAM, T, , 2
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.03,0.021,0.003,0.01
!*
mP,EX,1,7.17e10
MP,nuXY,1,0.33
K,1,0,0,0,
K,2,0.5,0,0,
K,3,0.25,1,0,
LSTR, 1, 2
LATT,1, ,1, , 3, ,1
LESIZE,ALL, , ,10
LMESH, 1
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP,FAST
/ESHAPE,1.0
DK,1, , , ,0,ALL, , , , ,
FK,2,FX,-1
FINISH
/SOL
antype,0
eqslv,spar
pstres,on
solve
finish
/SOLU
!*
ANTYPE,1
!*

```

```
BUCOPT,LANB,1,0,0,
MXPAND,1,0,0,1,0.001,
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,FIRST
PLDISP,1
FINISH
```

12.3 实例详解 2：复合材料圆柱壳非线性屈曲分析

本节介绍在 ANSYS 中进行梁结构的横向弯扭失稳问题分析的方法，并通过计算确定梁发生失稳时的临界载荷。

12.3.1 问题描述与分析

本实例分析一个对边简支的复合材料层合板 $[0/45/-45/90]_{2s}$ 圆柱壳的非线性中心作用一个垂直的集中载荷的情况，如图 12.21 所示，分析其屈曲载荷。几何特性： $R=2540\text{m}$ ， $L=254\text{m}$ ， $\theta=0.1\text{rad}$ ， $h=1.02\text{m}$ ，层合板共 8 层。单层板材料为均质、正交各向异性、线弹性的连续介质，其弹性材料常数为 $E_{11}=140\text{GPa}$ ， $E_{22}=E_{33}=10\text{GPa}$ ， $G_{12}=G_{13}=7\text{GPa}$ ， $G_{23}=3.36\text{GPa}$ ， $\nu_{12}=\nu_{13}=0.3$ ， $\nu_{23}=0.49$ 。由于结构的对称性，取其 1/4 进行有限元分析即可，有限元计算采用三维层单元 SOLID46。

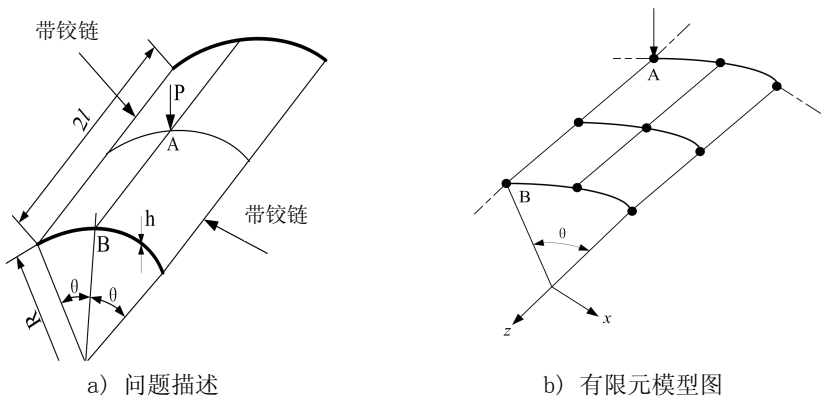


图 12.21 几何模型

12.3.2 求解过程（GUI 方法）

12.3.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，如图 12.22 所示。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：**C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter12\12-2**，在 Job Name 栏中输入工作文件名：**Chapter12-2**。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行

ANSYS 程序。

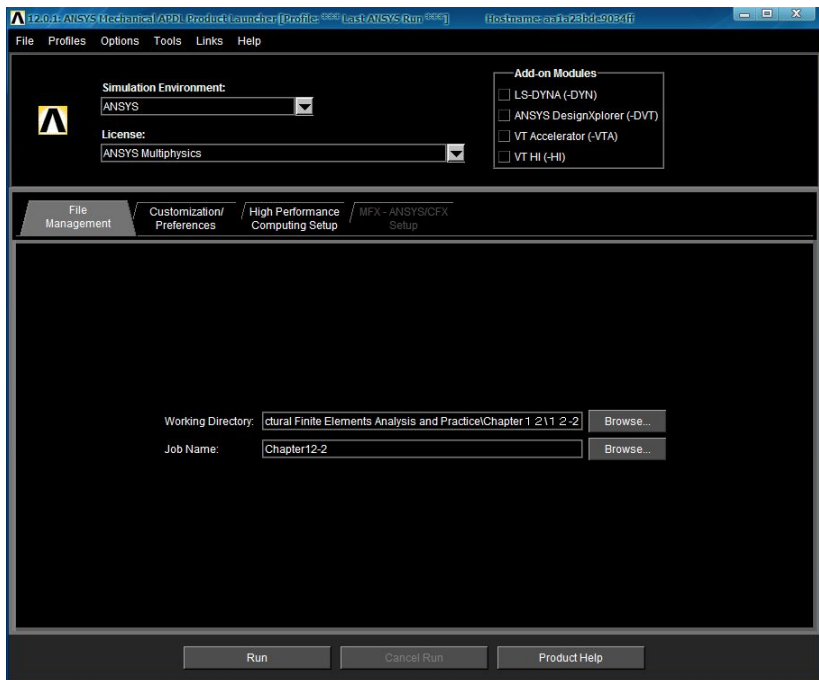


图 12.22 ANSYS 起始窗口

step 2 选择 Utility Menu→File→Change Title 命令，在弹出的对话框中输入 nonlinear buckling analysis of a composite shell，然后单击 OK 按钮。

12.3.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，如图 12.23 所示，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

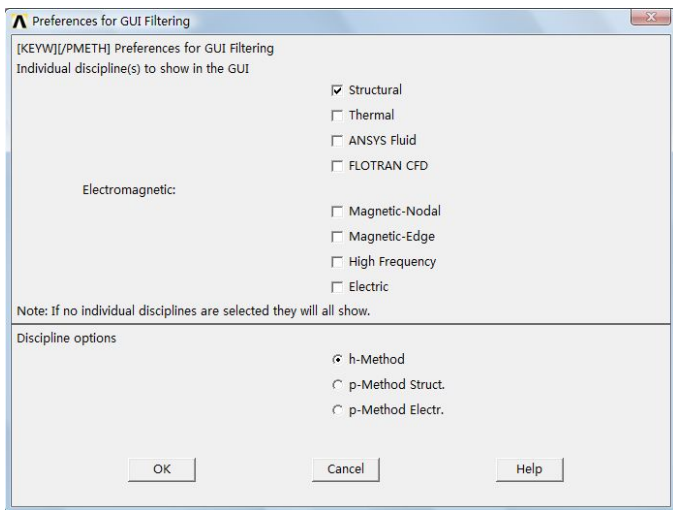


图 12.23 Preferences for GUI Filtering 对话框

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Types→Add/Edit/Delete 命令,弹出 Element Types 对话框,如图 12.24 所示,单击 Add 按钮,弹出 Library of Element Types 对话框,在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid 中的 layered 46 单元,如图 12.25 所示。单击 Element Types 对话框中的 Options 按钮,弹出 SOLID46Element Type Options 窗口,保留默认选项,单击 OK 按钮,弹出 More SOLID46 element type options 对话框,将 K5 设置为 Output both,将 K8 设置为 All Layers,如图 12.26 所示,单击 OK 按钮关闭该对话框,单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

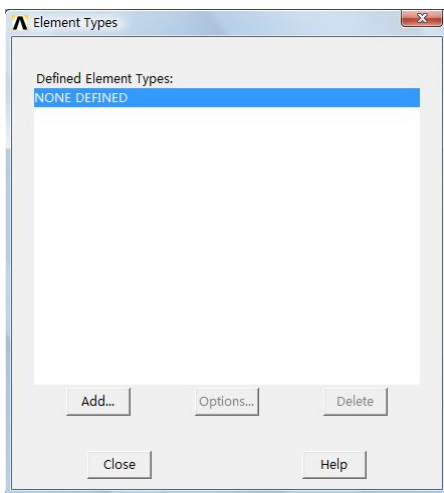


图 12.24 Element Types 对话框

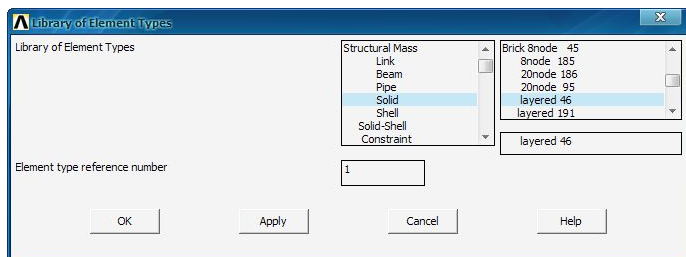


图 12.25 Library of Element Types 对话框

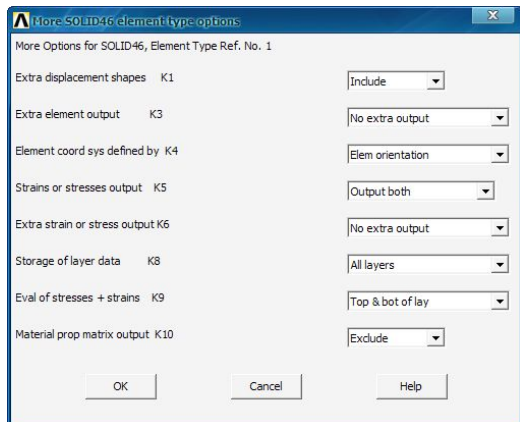


图 12.26 More SOLID46 element type options 对话框

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Types→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，在弹出的对话框中单击 OK 按钮，保持默认选项，同时弹出 Real Constant Set Number 1,for SOLID46 对话框，输入 NL=8，单击 OK 按钮，弹出 Real Constant Set Number 1,for SOLID46 附加对话框，在其中输入参数，如图 12.27 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

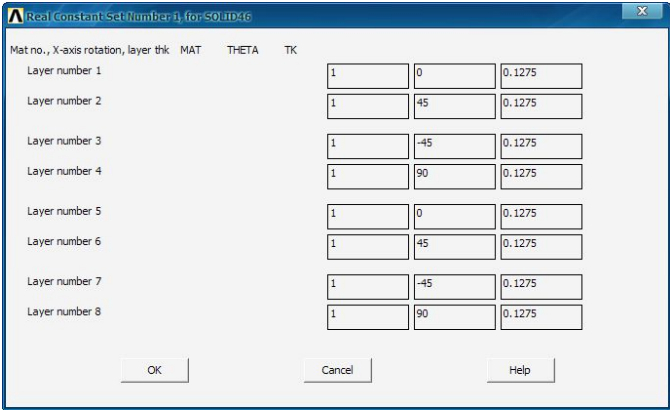


图 12.27 Real Constant Set Number 1, for SOLID46 附加对话框

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Orthotropic 选项，在弹出的对话框中输入参数，如图 12.28 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

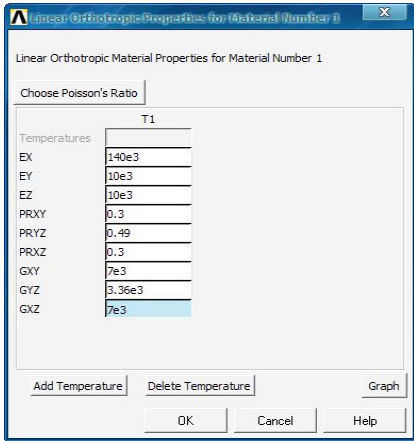


图 12.28 正交各向异性材料参数输入对话框

12.3.2.3 创建几何模型

step 1 选择 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cylindrical 命令，选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS 命令与 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 命令，定义表 12.2 中所列的节点与关键点。

表 12.2 节点与关键点的编号与坐标

	N1	K1	K2	K3	K4	K5
X	2540	2540	2540	2540	2540	2538.98
Y	90	90	84.2704	90	84.2704	90
Z	0	0	0	254	254	254

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→Straight Line 命令，在弹出的 Create Straight Line 拾取菜单中输入 1,5，按 Enter 键建立直线 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs 命令，在弹出的 Create Areas Thru KPs 拾取菜单中输入 1,3,4,2，按 Enter 键建立面 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Lines 命令，在 Sweep Areas along Lines 拾取菜单中分别输入面 1 和线 1，建立体 1，如图 12.29 所示。

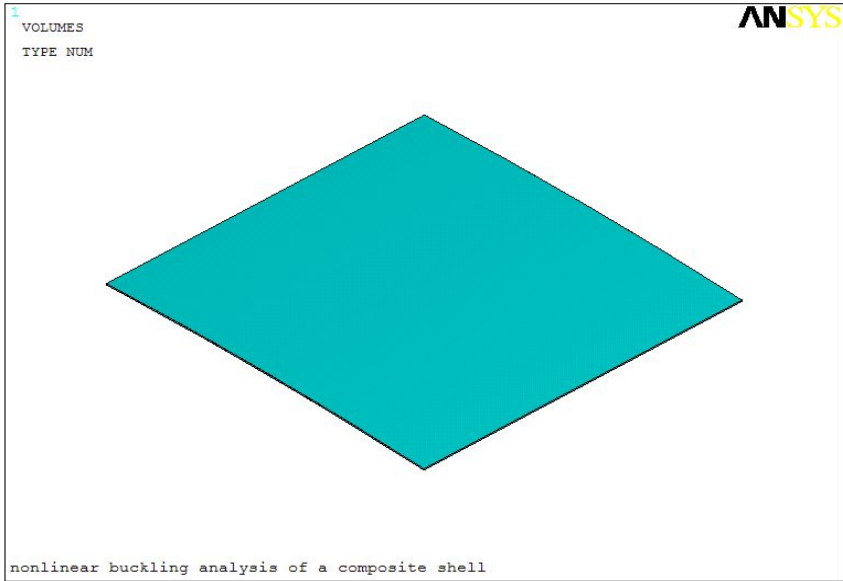


图 12.29 圆柱壳几何模型

12.3.2.4 划分网格

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 命令，弹出拾取菜单，拾取线 1，单击 OK 按钮，在弹出的对话框的 NDIV 栏中输入 1，如图 12.30 所示。用同样的方法将线 2、线 3 的 NDIV 设为 15。选择 Main Menu→Preprocessor→MeshTool 命令，单击 Mesh 按钮，弹出 Mesh Volumes 拾取菜单，拾取体 1，单击 OK 按钮执行网格划分，划分所得的有限元模型如图 12.31 所示。选择 Main Menu→Preprocessor→Numbering Cntrls→Merge Items 命令，单击 OK 按钮退出。

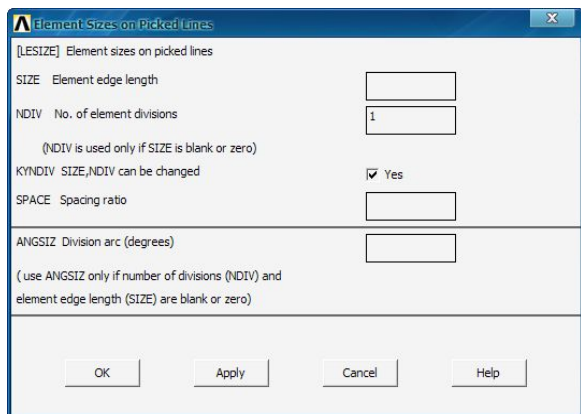


图 12.30 Element Sizes on Picked Lines 对话框

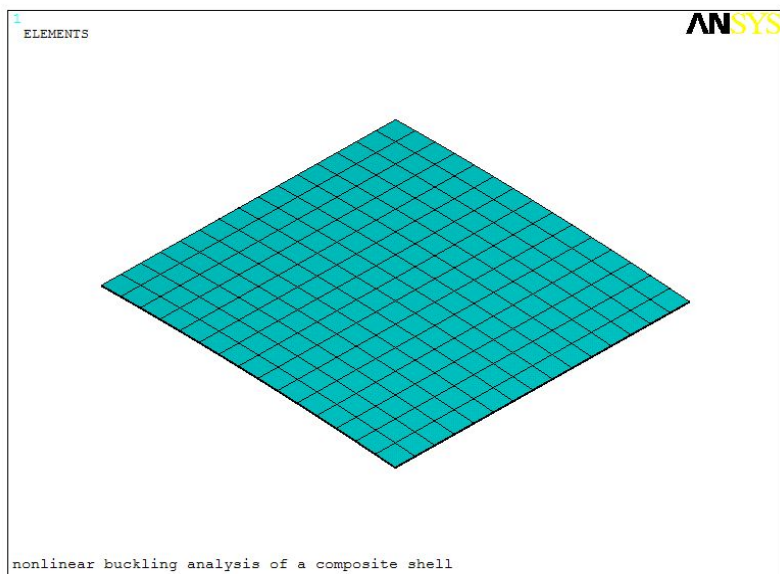


图 12.31 网格有限元模型

12.3.2.5 定义边界条件

step 1

选择 Utility Menu→Select→Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，分别选择 By Location、Z coordinates 选项，在 Min,Max 栏中输入 0,0，如图 12.32 所示，单击 OK 按钮退出。选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C.→On Nodes 命令，弹出 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml 下拉列表框中选择 Z-axis 选项，如图 12.33 所示，单击 OK 按钮退出。

step 2

选择 Utility Menu→Select→Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，分别选择 By Location、Y coordinates 选项，在 Min,Max 栏中输入 90,90，单击 OK 按钮退出。选择 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B. C.→On Nodes 命令，弹出 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml 下拉列表框中选择 X-axis 选项，单击 OK 按钮退出。

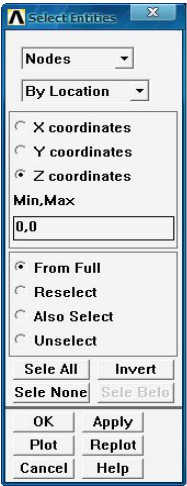


图 12.32 Select Entities 对话框

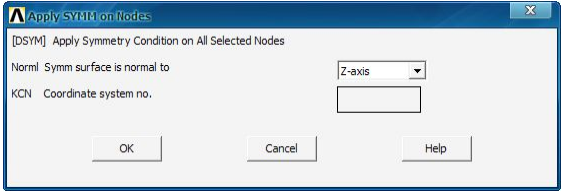


图 12.33 Apply SYMM on Nodes 对话框

step 3 选择 **Utility Menu**→**Select**→**Entities** 命令，弹出 **Select Entities** 对话框，分别选择 **By Location**、**Y coordinates** 选项，在 **Min,Max** 栏中输入 **84.2,84.3**，单击 **OK** 按钮退出。选择 **Main Menu** → **Preprocessor** → **Loads** → **Define Loads** → **Apply** → **Structural** → **Displacement**→**On Nodes** 命令，在弹出的对话框中单击 **Pick All** 按钮，在随后弹出的对话框中选择 **ALL DOF** 选项，单击 **OK** 按钮退出。施加约束后的结果如图 12.34 所示。

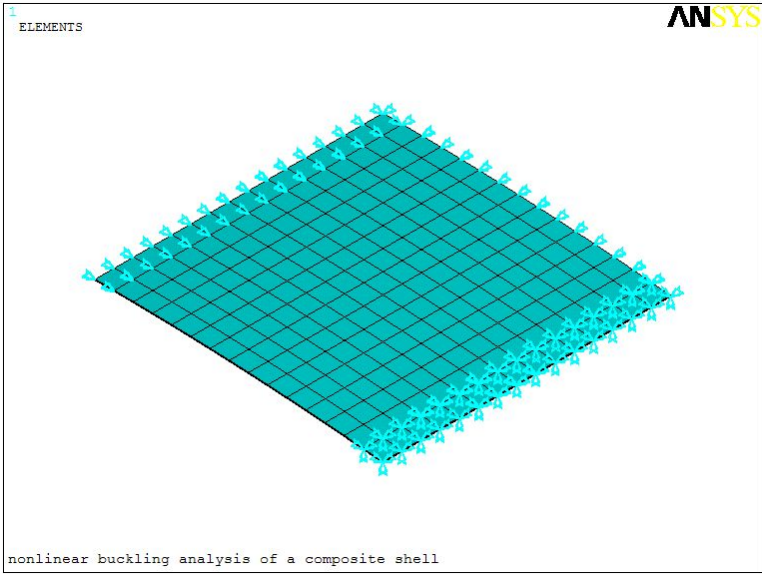


图 12.34 施加约束后的结果

12.3.2.6 施加载荷并求解

step 1 选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Static**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Sol'n Controls** 命令，弹出 **Solution Controls** 对话框，在 **Analysis Options** 下拉列表框中选 **Large deform effects option**（大变型效应选项）复选框，使之 **ON**，然后单击

OK 按钮。选择 **Utility Menu**→**Select**→**Entities** 命令，弹出 **Select Entities** 对话框，单击 **Select All** 按钮，单击 **Cancel** 按钮退出。



如果不进行选择操作，在后续操作中无法选择节点 1。

step 2

在结点 1 的 Y 方向施加一个大小为 -10N 的力，选择 **Main Menu**→**Solution**→**Load**→**Apply**→**Force/Moment**→**On Nodes** 命令，在弹出的对话框中输入 1，按 **Enter** 键选中节点 1，单击 **OK** 按钮，在随后弹出的对话框中选择 **FY** 选项，在 **Value** 框中输入 -10，单击 **OK** 按钮退出。

step 3

设置载荷步选项。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Unabridged Menu**→**Load step opts**→**Time/Frequenc**→**Time and substeps** 命令，弹出时间和时间步选项对话框。在 **Number of substeps**（子步数）栏中输入 60，单击 **OK** 按钮退出。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Unabridged Menu**→**Load step opts**→**Output ctrls**→**DB/Results File** 命令，弹出对数据库和结果文件进行写入的控制对话框。在 **Item** 栏中选择 **all** 选项，在 **FREQ** 栏中选择 **Every Substep** 选项，单击 **OK** 按钮退出。

step 4

选择弧长法。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Unabridged Menu**→**Load step opts**→**Nonlinear**→**Arc-length opts** 命令，弹出 **Arc-length opts T**（时间和时间步选项）对话框，将 **KEY**（Arc-length method on/off）选项设置为 **ON**，在 **MAXARC**（Maximum multiplier）栏中输入 4，单击 **OK** 按钮退出。



采用弧长法时，不要指定 Time 值。在进行弧长分析时，Time 值实际上是载荷因子（给定载荷的乘子）。

step 5

求解问题。选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve Current LS** 命令，检阅状态窗口中的信息，然后单击 **Close** 按钮。单击 **Solve Current Load Step**（求解当前载荷步）对话框中的 **OK** 按钮，开始求解。求解完成后，选择 **Main Menu**→**Finish** 命令，暂时退出求解器，向程序表明计算已经完成。

12.3.2.7 结果查看

step 1

定义时间历程后处理变量。选择 **Main Menu**→**TimeHist Postpro**→**Define Variables** 命令，弹出 **Defined Time-History Variables** 对话框，单击 **Add** 按钮，弹出 **Add Time-History Variables** 对话框，选择 **Nodal DOF Result** 选项，单击 **OK** 按钮，弹出 **Define Nodal Data** 拾取菜单，选择节点 1，单击 **OK** 按钮，弹出 **Define Nodal Data** 对话框，如图 12.35 所示进行设置，单击 **OK** 按钮退出。选择 **Main Menu**→**TimeHist Postpro**→**Math Operations**→**Multiply** 命令，在弹出的对话框中定义变量 4，如图 12.36 所示，用同样的方法定义变量 5，如图 12.37 所示。

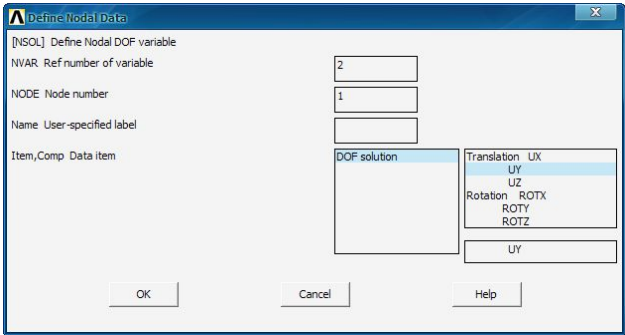


图 12.35 Define Nodal Data 对话框

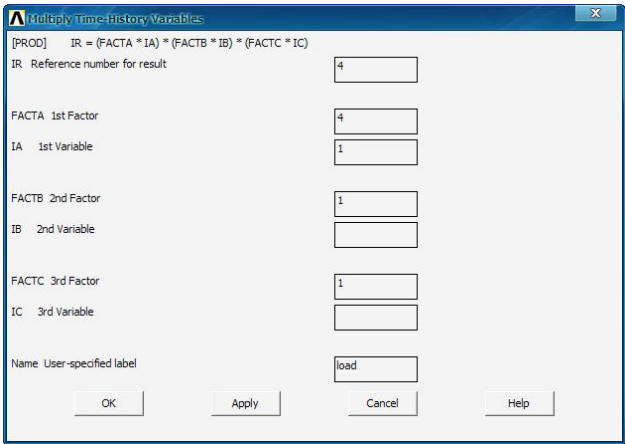


图 12.36 定义变量 4

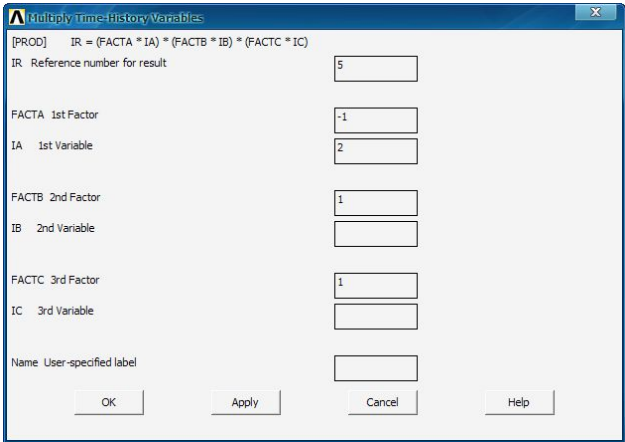


图 12.37 定义变量 5

step 2 绘制载荷—位移曲线。选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes** 命令，在弹出的对话框中进行设置，定义显示的横、纵坐标标题和显示区间，如图 12.38 所示。选择 **Main Menu→TimeHist Postpro→Settings→Graph** 命令，设置横坐标变量，如图 12.39 所示，单击 **OK** 按钮退出。选择 **Main Menu→TimeHist Postpro→Graph Variables** 命令，在弹出的对话框的 **NVAR1** 文本框中输入 **4**，单击 **OK** 按钮，即可绘制载荷—位移曲线，如图 12.40 所示。

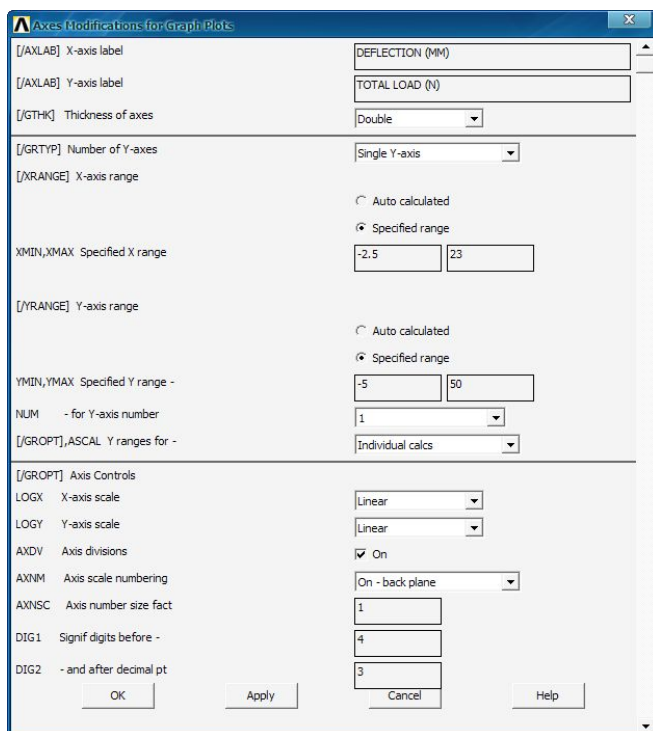


图 12.38 Axes Modifications for Graph Plots 对话框

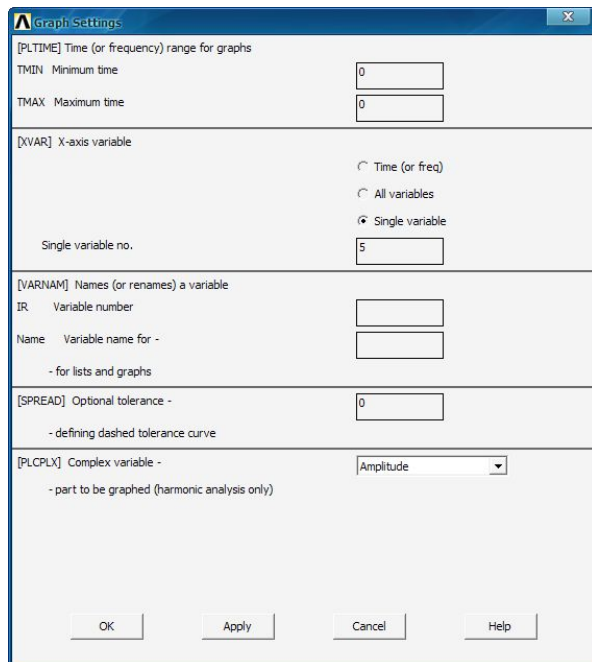


图 12.39 Graph Settings 对话框

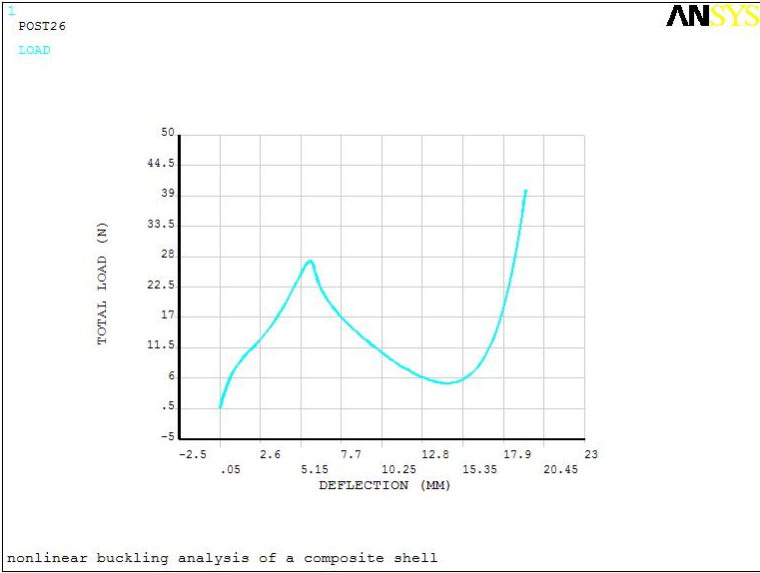


图 12.40 载荷—位移曲线

板壳结构具有屈曲后强度，对于板壳这是一个很好的特征。从图 12.40 中可以看出，圆柱壳的非线性屈曲极限载荷约为 28N，也就是图中极值点所对应的纵坐标的数值。

12.3.3 命令流

```
FINI
/CLE
/TITLE,nonlinear buckling analysis of a composite shell
/PREP7
smrt,off
ET,1,SOLID46
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,8,1
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0
*SET,_RC_SET,1,
R,1
RMODIF,1,1,8,0,0,0
RMODIF,1,7,0
RMODIF,1,13,1,0,0.1275,1,45,0.1275,
RMODIF,1,19,1,-45,0.1275,1,90,0.1275,
RMODIF,1,25,1,0,0.1275,1,45,0.1275,
RMODIF,1,31,1,-45,0.1275,1,90,0.1275,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
```



```

MPDATA,EX,1,,140e3
MPDATA,EY,1,,10e3
MPDATA,EZ,1,,10e3
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPDATA,PRYZ,1,,0.49
MPDATA,PRXZ,1,,0.3
MPDATA,GXY,1,,7e3
MPDATA,GYZ,1,,3.36e3
MPDATA,GXZ,1,,7e3
R1 = 2540 ! 指定壳的中面半径
L = 254 ! 指定壳体纵向长度的一半
PI = 4*ATAN(1) ! 指定计算要用到的 PI 值
THETA = 0.1*180/PI ! 将弧度值换算为角度值
CSYS,1 ! 指定工作坐标系为圆柱坐标系
N,1,R1,90 ! 建立节点 1
K,1,R1,90
K,2,R1,(90-THETA)
K,3,R1,90,L
K,4,R1,(90-THETA),L
K,5,(R1-1.02),90
l,1,5
A,1,3,4,2
LESIZE,1,,1
LESIZE,2,,15
LESIZE,3,,15
vdrag,1,,,,,1
/VIEW, 1 ,1,1,1
vMESH,1
NUMMRG,NODE
!APPLY BOUNDARY CONDITIONS
NSEL,S,LOC,Z,0
DSYM,SYMM,Z
NSEL,S,LOC,Y,90
DSYM,SYMM,X
NSEL,S,LOC,Y,(90-THETA)
D,ALL,UX,,,,,UY,UZ
NSEL,ALL
FINISH
SAVE,BUCKLE2,DB
RESUME,BUCKLE2,DB
/SOLUTION
ANTYPE,STATIC
NLGEOM,ON ! 打开大变形效应选项
OUTRES,,1 ! 输出所有子步的结果
F,1,FY,-10 ! 根据对称性施加载荷的 1/4
NSUBST,60 ! 指定子步数
ARCLEN,ON,4
SOLVE
FINISH
/POST26
NSOL,2,1,U,Y ! 存储节点 1 的 Y 方向位移

```

```
PROD,4,1,,,LOAD,,,4*10      ! 根据对称性指定真实载荷变量
PROD,5,2,,,,,-1             ! 改变位移值的正负号
/AXLAB,X, DEFLECTION (MM)
/AXLAB,Y, TOTAL LOAD (N)
/XRANGE,-2.5,23
/YRANGE,-5,50
XVAR,5
PLVAR,4                      ! 绘制载荷-Y 方向上的位移曲线
FINISH
```

12.4

小结

本章从有限元计算的角度对结构稳定性进行分析，根据理论原理与算法选择的不同，将其分为特征值屈曲分析和非线性屈曲分析两种分析方法，并结合工程实例对两种方法进行论述。

特征值屈曲分析属于线性分析，对于简单的杆压缩问题，先选择适当的单元划分，再计算所得屈曲载荷，和经典欧拉值吻合。它的优点是分析简单、计算速度快。它针对的是完善结构，不考虑缺陷和材料非线性等的影响，对结构临界失稳力的预测往往要高于结构实际的临界失稳力，因此在实际的工程结构分析中一般不用特征值屈曲分析。但特征值屈曲分析作为非线性屈曲分析的初步评估是非常有用的。其基本步骤为：建立几何模型或有限元模型；打开应力效应选项，以获得屈曲分析用的应力刚度，进行静力求解；设置屈曲模态数目和扩展选项，进行特征值屈曲求解；观察结果，得到各个屈曲模态的解。

非线性分析实际上就是非线性全过程分析，它的优点是能够得到结构和构件的屈曲后特性，可以考虑初始缺陷、材料的非线性及边界的非线性性能，对薄板屈曲问题甚至更复杂的问题，能得到更接近实际的结果。其基本步骤是：首先打开非线性选项，设置求解控制选项，可根据问题类型而定。其次是模型修正问题或缺陷问题，在大多数实际问题分析中，该项可根据实际结构修正模型，也可不修正模型，直接进行计算分析；但对于理想柱、梁侧倾的非线性分析，则必须进行模型修正（可采用实际缺陷或采用 ANSYS 设置），否则无法进行非线性分析。根据载荷位移全过程曲线可得到极值。



Part

第 4 部分 ANSYS 工程应用 实战演练

第 13 章 ANSYS 在复合材料结构中的应用

第 14 章 ANSYS 在机械工程中的应用

第 15 章 ANSYS 在土木工程中的应用



第 13 章 ANSYS 在复合材料结构中的应用

本章包括

- ◆ ANSYS 提供的复合材料单元简介
- ◆ 复合材料结构有限元分析基本过程
- ◆ 实例详解 1：复合材料梁弯曲分析
- ◆ 实例详解 2：复合材料四边简支板模态分析

复合材料结构是由两种或两种以上性质不同的材料复合制成的结构，主要组分是增强材料和基体材料。复合材料不仅保持了增强材料和基体材料本身的优点，而且通过各相组分性能的互补和关联，获得更优异的性能。复合材料具有比强度大、比刚度高、抗疲劳性能好、各向异性，以及材料性能可设计的特点，被广泛应用于航空、航天、军事、民用等诸多领域，可以获得显著的减重效益，并能改善结构性能，从而提高经济效益。

本章首先介绍 ANSYS 程序中提供的复合材料单元，然后简述复合材料结构有限元分析的基本过程，最后以两个实例详细讲解 ANSYS 在复合材料结构分析中的具体操作过程，使读者熟悉使用 ANSYS 程序进行复合材料结构分析的基本方法和步骤。

13.1 ANSYS 中提供的复合材料单元简介

ANSYS 程序提供了一种特殊的复合材料单元——层单元，以模拟各种复合材料。铺层数可达 250 层以上，并提供一系列技术来模拟各种复杂层合结构。复合材料层单元支持非线性、振动特性、热应力、疲劳断裂等各种结构和热的分析功能和算法。

ANSYS 提供了多种用于建立复合材料模型的单元类型，包括 SHELL99、SHELL91、SHELL181、SHELL190、SOLID46、SOLID186 和 SOLID191 七种单元。具体应选择哪一类单元要根据具体应用和所需计算结果类型等来确定。

13.1.1 SHELL99——线性层状结构壳单元

SHELL99 是一种 8 节点三维壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元主要适用于薄到中等厚度的板和壳结构，一般要求宽厚比应大于 10。对于宽厚比小于 10 的结构，则应考虑选用 SOLID46 来建立模型。SHELL99 允许有多达 250 层的等厚材料层，或者 125 层厚度在单元面内呈现双线性变化的不等材料层。如果材料层大于 250，用户可通过输入自己的材料矩阵形式来建立模型，还可以通过一个选项将单元节点偏置到结构的表层或底层。

13.1.2 SHELL91——非线性层状结构壳单元

SHELL91 与 SHELL99 有些类似，只是它允许的复合材料最多只有 100 层，而且用户不能输入自己的材料性能矩阵。但是，SHELL91 支持塑性、大应变行为及一个特殊的“三明治”选项，而 SHELL99 则不能。另外，SHELL91 更适用于大变形的情况。

13.1.3 SHELL181——有限应变壳单元

SHELL181 是 4 节点三维壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元支持所有的非线性功能（包括大应变），允许有多达 250 层的材料层。应该通过截面命令（而不是实常数）来定义层的信息，可以通过 FC 命令来指定失效准则。

13.1.4 SOLID46——三维层状结构体单元

SOLID46 是 8 节点三维实体单元 SOLID45 的一种叠层形式，其几何模型如图 13.1 所示。每个节点有 3 个自由度（UX, UY, UZ）。它可用来建立叠层壳或实体的有限元模型，每个单元允许有多达 250 层的等厚材料层，或者 125 层的厚度在单元面内呈现双线性变化的不等厚材料层。该单元的另一个优点是可以用叠加几个单元的方式来对多于 250 层的复合材料建立模型，并允许沿厚度方向的变形斜率连续。用户也可输入自己的本构矩阵。SOLID46 调整横向的材料特性，以允许在横向上为常应力。与 8 节点壳单元相比较，SOLID46 的阶次要低一些，因此，如要在壳结构应用中得到与 SHELL91 或 SHELL99 相同的求解精度，需要更密的网格。

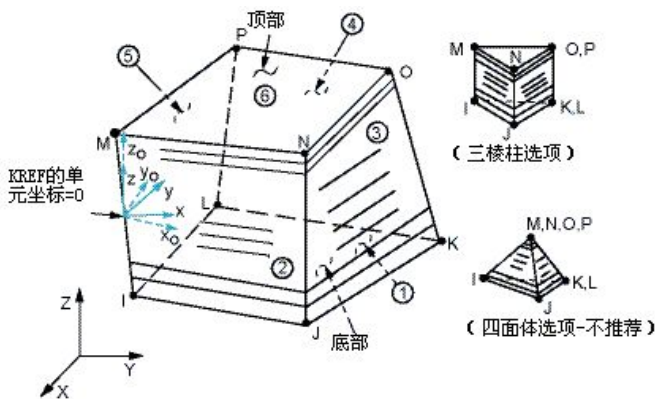


图 13.1 SOLID46 单元几何模型

13.1.5 SOLID191——层状结构体单元

SOLID191 是 20 节点三维实体单元 SOLID95 的一种叠层形式，其几何模型如图 13.2 所示。每个节点有 3 个自由度（UX, UY, UZ）。它可用来建立厚的叠层壳或实体的有限元模型，每个单元允许有多达 100 层的材料层。与 SOLID46 类似，SOLID191 可以模拟厚度上的不连续。SOLID46 可以调整横向的材料特性，以允许在横向上为常应力。SOLID191 单元不支持非线性材料或大挠度。

13.1.6 其他可用于复合材料分析的单元

除上述层单元外，还有其他的一些具有层功能的单元，下面简要介绍。

◆ SOLID95 是 20 节点的结构实体单元，在 KEYOPT(1)=1 时，其作用与单层的 SOLID191 单元类似，包括应用方位角和失效准则，还允许非线性材料和大挠度。

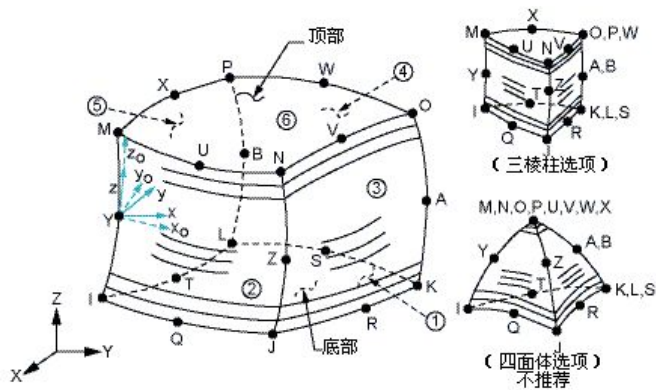


图 13.2 SOLID191 单元几何模型

- ◆ SHELL63 是 4 节点壳单元，可用于对“三明治”壳结构作粗糙、近似的计算。比如，两块金属片之间夹有一层聚合物的问题就很典型，此时聚合物的弯曲刚度相对于金属片的弯曲刚度来说是一个小量。用户可以用实常数 **RMI** 来修正单元的弯曲刚度，使其等效于由金属片引起的弯曲刚度。从中面到外层纤维的距离（实常数 **CTOP** 和 **CBOT**）可用来获得“三明治”壳的表层输出应力。这种单元不如 **SHELL91**、**SHELL99** 和 **SHELL181** 那样用得频繁，故后面不再论述。
- ◆ SOLID65 是三维钢筋混凝土实体单元，可以模拟在 3 个用户指定方向配筋的各向同性介质。
- ◆ BEAM188 和 BEAM189 为三维有限应变梁单元，其截面可以包含多种材料。

13.2 复合材料结构有限元分析基本过程

与各向同性材料相比，建立复合材料的模型要复杂一些。选定了复合材料结构单元之后，如何对单元进行设置，并进行复合材料结构有限元分析，有哪些具体的注意事项，本节将详细讨论。

13.2.1 定义材料的叠层结构

复合材料最重要的特征就是其叠层结构。每层材料都可能由不同的正交各向异性材料构成，并且其主方向也可能各不相同。对于叠层复合材料，纤维的方向决定了层的主方向。

有以下两种方法可用来定义材料层的配置。

- ◆ 通过定义各层材料的性质。
- ◆ 通过定义表示宏观力、力矩与宏观应变、曲率之间相互关系的构矩阵（只适合于 **SOLID46** 和 **SHELL99**）。

13.2.1.1 定义各层材料的性质

这种方法由下到上一层一层地定义材料层的配置。底层为第一层，后续(layer)沿单元坐标系的 **Z**

轴正方向自底向上叠加。如果叠层结构是对称的，可以只定义一半的材料层。

有时，某个物理层可能只延伸到模型的一部分。为了建立连续的层，可以把这些中断的层的厚度设置为零，图 13.3 显示了一个四层模型，其中第二层在某处中断了。

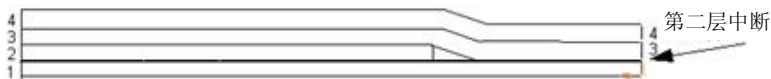


图 13.3 有中断层的层叠模型

对于每一层材料，可通过选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Real Constants**→**Add/Edit/Delete** 命令来定义如下性质。

- ◆ 材料性质（通过材料参考号 **MAT** 来定义）。
- ◆ 层的定向角（**THETA**）。
- ◆ 层的厚度（**TK**）。

分层的截面可以通过选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Sections**→**Shell**→**Lay-up**→**Add/Edit** 命令来定义下面的属性。

- ◆ 材料性质（通过材料参考号 **MAT** 来定义）。
- ◆ 层的定向角（**THETA**）。
- ◆ 层的厚度（**TK**）。
- ◆ 每层积分点的数目（**NUMPT**）。

1. 材料性质

选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**→**Structural**→**Linear**→**Elastic**→**Isotropic** 或 **Orthotropic** 命令，定义线性材料特性。

用 **TB** 命令定义非线性数据表（塑性仅可用于 **SOLID191** 和 **SHELL91** 单元）。唯一不同的是，复合材料单元的材料参考号由其实常数表来指定。对于层单元，各层的线性材料特性可以是各向同性，也可以是正交异性。材料方向平行于层坐标系（由单元坐标系和层定向角定义）。

2. 层的方向角

它定义层坐标系相对于单元坐标系的角度，是这两个坐标系的 **X** 轴之间的夹角（单位为“度”）。默认情况是层坐标系与单元坐标系平行。所有单元都有默认的坐标系，可选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Attributes**→**Default Attribs** 命令来改变。

3. 层的厚度

如果层的厚度是常数，用户只需定义节点 **I** 处的厚度 **TK(I)**，否则 4 个角节点处的厚度都需输入。中断的层必须为零厚度。

4. 每层的积分点数目

用于确定计算结果的详细程度。对于非常薄的层，当其与很多其他层一起使用时，有一个积分点就足够了。但对于层数很少的片状结构，需要的积分点就比较多，默认为 3。本特性仅适用于通过截面命令定义的截面。

5. 注意

目前,GUI 只允许层数(实常数)最大值为 100。如果需要层数大于 100,可以使用 R 和 RMORE 命令来实现。

13.2.1.2 定义本构矩阵

这是定义各层材料性质的另一种方式,适用于 SOLID46 和 SHELL99 (通过设置其 KEYOPT(2) 值)。该矩阵表示了单元的力—力矩与应变—曲率的关系,必须在 ANSYS 外进行计算。它们可以通过 KEYOPT(1)设置为求解输出的一部分。这种方法的主要优点如下。

- ◆ 它允许用户合并聚合复合材料的性质。
- ◆ 支持热载荷向量。
- ◆ 可表示层数无限制的材料。

矩阵的元素作为实常数来定义。通过定义单元平均密度(实常数 AVDENS)还可以将质量影响考虑进去。但是,使用这种方法时,由于没有输入每层材料各自的信息,故不能得到每层材料的详细结果。

13.2.1.3 夹层 (“三明治”) 结构和多层结构

夹层结构有两个薄的面板和一个厚但相对软的夹心层。图 13.4 显示了一个夹层结构,并假定夹心层承受了所有的横向剪切载荷,而面板则承受了所有的(或几乎所有的)弯曲载荷。

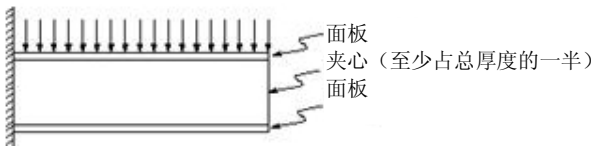


图 13.4 夹层结构

夹层结构可用 SHELL63、SHELL91 或 SHELL181 单元来建立有限元模型。SHELL63 只能有一层,但可通过实常数选项来模拟,即通过修改有效弯曲惯性矩和中面到外层纤维的距离来考虑对夹心层的影响。SHELL91 可用于夹层结构并且允许面板和夹心层有不同的性质,设置该单元的 KEYOPT(9)=1 即可激活“夹层”选项,只有 SHELL91 有此夹层选项。SHELL181 通过能量等效方法模拟横向剪切偏转。

13.2.1.4 节点偏置

SHELL181 通过截面命令定义截面,可以在定义截面时通过 SECOFFSET 命令偏置节点。使用 SHELL91 和 SHELL99 单元的节点偏置选项 (KEYOPT(11)) 可将单元的节点设置在壳的底面、中面或顶面上。图 13.5 和图 13.6 显示了如何方便地建立台阶状的叠层板模型。图 13.5 表示节点在板的中面 (KEYOPT(11)=0), 各板在该点对齐。图 13.6 表示节点在板的底面 (KEYOPT(11)=1), 各板在该点对齐。

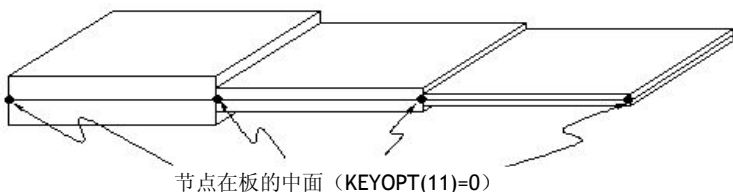


图 13.5 SHELL91 和 SHELL99 节点在中面的分层壳单元

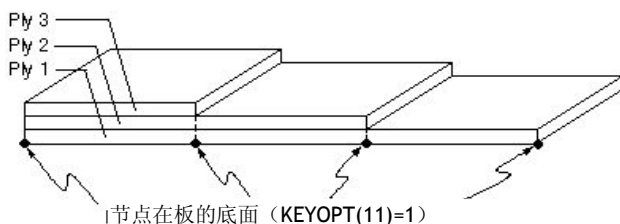


图 13.6 SHELL91 和 SHELL99 节点在底面的分层壳单元

13.2.2 定义流

失效准则用于获知在所加载荷下, 各层是否失效。用户可从 3 种预定义好的失效准则中进行选择, 或者自定义多达 6 种的失效准则。3 种预定义失效准则如下。

- ◆ 最大应变失效准则, 它允许有 9 个失效应变。
- ◆ 最大应力失效准则, 它允许有 9 个失效应力。
- ◆ Tsai-Wu 失效准则, 它允许有 9 个失效应力和 3 个附加的耦合系数。

定义失效准则的命令有 TB 命令族和 FC 命令族。

- ◆ TB 命令族包括 TB、TBTEMP 和 TBDATA 命令, 可执行如下菜单命令: Main Menu → Preprocessor → Material Props → Failure Criteria。
- ◆ FC 命令族包括 FC、FCDELE 和 FCLIST 命令, 可执行如下菜单命令: Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Nonlinear → Inelastic → Non-Metal Plasticity → Failure Criteria 或 Main Menu → General Postprocessor → Failure Criteria。

定义失效准则的一些注意事项如下。

- ◆ TB 命令 (TB、TBTEMP 和 TBDATA) 仅适用于 SHELL91、SHELL99、SOLID46 或 SOLID191, 而 FC 和 FCLIST 命令适用于所有的二维或三维结构实体单元和三维壳单元。
- ◆ 失效准则是正交各向异性的, 因此用户必须输入所有方向上的失效应力或失效应变值 (在压缩值等于拉伸值时例外)。
- ◆ 如果不希望在某个特定方向上检查失效应力或失效应变, 则在那个方向上定义一个大值。
- ◆ 用户可通过用户子程序 USRFC1-USRFC6 自定义失效准则, 这些子程序应事先与 ANSYS 程序作联接。

13.2.3 建模和后处理规则

在复合材料单元的建模和后处理中，应注意以下规则。

- ◆ 复合材料会体现出几种类型的耦合效应，如弯扭耦合、拉弯耦合等。这是由具有不同性质的多层材料互相重叠引起的。其结果是，如果材料层的积叠顺序是非对称的，则即使模型的几何形状和载荷都是对称的，也不能按照对称条件只求解一部分模型，因为结构的位移和应力可能不对称。
- ◆ 在模型自由边界上的层间剪切应力通常都是很重要的。要求得在这些部位相对精确的层间剪切应力，则模型边界上的单元尺寸应约等于总的叠层厚度。对壳来说，增加实际材料层数并不一定提高层间剪切应力的求解精度。但是，如果用 **SOLID46**、**SOLID95**、**SOLID191** 单元，则沿厚度方向上的叠加单元会使得沿厚度方向上层间应力的求解更为精确。壳单元的层间横向剪应力的计算基于单元上下表面不承受应力的假设。这些层间剪应力只在单元的中心处计算，而不是沿着单元边界。建议使用壳—实体子模型精确计算自由边的层间应力。
- ◆ 因为复合材料的求解需要大量的输入数据，故在进行求解之前应对这些数据作检验，可用如下命令来完成这些工作。
 - **ELIST 命令**：列表显示所有被选单元的节点和属性，执行菜单命令：**Utility Menu→List→Elements**。
 - **EPLLOT 命令**：图形显示所有被选单元，执行菜单命令：**Utility Menu→Plot→Elements**。
 - **/PSYMB, LAYR, n 命令**：在执行 **EPLLOT** 命令之前执行该命令，可图形显示所选全部单元的第 n 层，它可用于显示并检验整个模型的每一层，执行菜单命令：**Utility Menu→PlotCtrls→Symbols**。
 - **/PSYMB, ESYS, 1 命令**：在 **EPLLOT** 命令之前执行该命令，可显示出那些默认单元坐标系被改变了的单元坐标系。
 - **LAYLIST 命令**：可根据实常数列表显示层的叠加顺序和 **SHELL99**、**SHELL91**、**SOLID46**、**SOLID191** 单元的任意两种材料的性能，还可以指定要显示层的范围，执行菜单命令：**Utility Menu→List→Elements→Layered Elements**。
 - **LAYPLOT 命令**：以卡片的形式图形显示层的积叠顺序，如图 13.7 所示，执行菜单命令：**Utility Menu→Plot→Layered Elements**。为清楚起见，各层以不同的颜色和截面线显示，截面线的方向表示了层的方向角（实常数 **THETA**），颜色表示了层的材料号（实常数 **MAT**），还可以指定要显示层的范围。

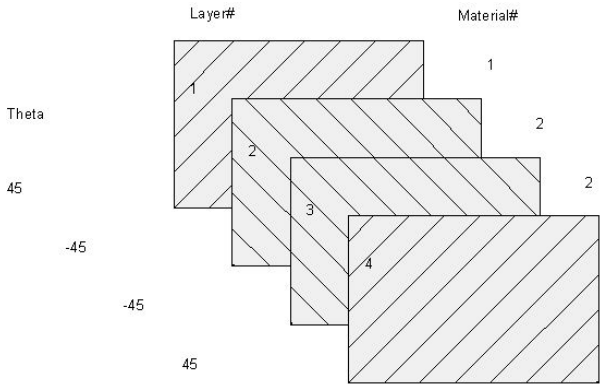


图 13.7 一个[45/-45/-45/45]叠层结果显示

- **SECPLOT 命令**：以卡片的形式图形显示截面的积叠顺序，执行菜单命令：**Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Plot Sections**。为清楚起见，各截面以不同的颜色和截面线显示，截面线的方向表示了层的方向角（THETA），颜色表示了层的材料号（MAT），还可以指定要显示层的范围。
- ◆ 默认情况下，只有第一层（底层）的底面、最后一层（顶层）的顶面以及最大失效值所在层的结果数据被写入结果文件，如果用户对所有层的结果数据都感兴趣，则应设置 **KEYOPT(8)=1**，但这样可能导致结果文件很大。
- ◆ 通过**[ESEL,S,LAYER]**命令选择特定层号的单元。如果某单元指定层为零厚度，则不被选中。
- ◆ 在后处理 **POST1** 中执行菜单命令 **Main Menu→General Postproc→Options for Outp** 或在 **POST26** 中执行菜单命令 **Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables** 来指定要处理哪一层的结果。在 **POST26** 中执行菜单命令 **Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables** 来定义到底是使用该层的顶面、中面还是底面的结果。在 **POST1** 中默认存储的是底层底面的结果、顶层顶面的结果和最大失效准则值所在层的结果。
- ◆ 在 **POST26** 中默认存储的是第一层的结果。如果单元 **KEYOPT(8)=1**（即保存所有层的结果），则 **LAYER** 和 **LAYERP26** 命令将存贮指定层的顶面（TOP）和底面（BOT）的结果，而中面（MID）的结果则由其顶面和底面的结果取平均值得到。对于横向剪切应力，**POST1** 中只能以线性变化的形式显示，而在单元解打印输出数据中的形式则可以是二次变化的。
- ◆ 默认情况下，**POST1** 将在总体笛卡尔坐标系中显示所有结果。执行菜单命令 **Main Menu→General Postproc→Options for Outp** 可将结果转换到别的坐标系中。对于层单元，如果执行了 **LAYER** 命令，且命令中指定的层号非零，则**[RSYS,SOLU]**命令可使结果在层坐标系中显示。

13.3 复合材料结构分析实例详解 1：复合材料梁弯曲分析

本节介绍复合材料梁的弯曲分析。

13.3.1 问题描述与分析

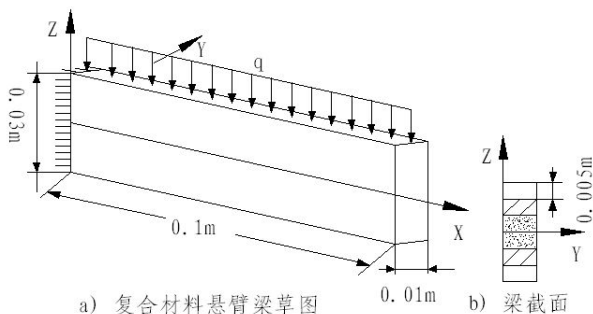


图 13.8 复合材料叠层板悬臂梁示意图

如图 13.8 所示的复合材料叠层板悬臂梁结构，长 0.1m，宽 0.01m，高 0.03m，上表面受均布

载荷 q 作用, 大小为 100N/m^2 。叠层板共 6 层, 各层材料属性和厚度均相同。其中, 材料弹性模量 $E=135000\text{N/m}^2$, 铺层为 $[0/45/90]_s$, 单层厚度为 0.005m 。

- ◆ 试计算层叠板梁自由端 Z 向位移及梁上的 von Mises 应力分布。
- ◆ 试计算层叠板梁上下表面 X 向应力。

假设该梁满足经典层合板理论, 则有 $v=0$ 。本节选用 SHELL99 建立有限元模型, 采用 GUI 图形化操作方法和命令流方法分别介绍 ANSYS 复合材料结构分析方法。

13.3.2 GUI 图形化求解过程

13.3.2.1 定义工作环境

step 1 直接启动 ANSYS, 进入 ANSYS Multiphysics Utility Menu 界面, 利用 File 菜单下的 Change Directory、Change Jobname 和 Change Title 命令分别定义文件工作路径、文件名和文件标题, 如图 13.9 所示。

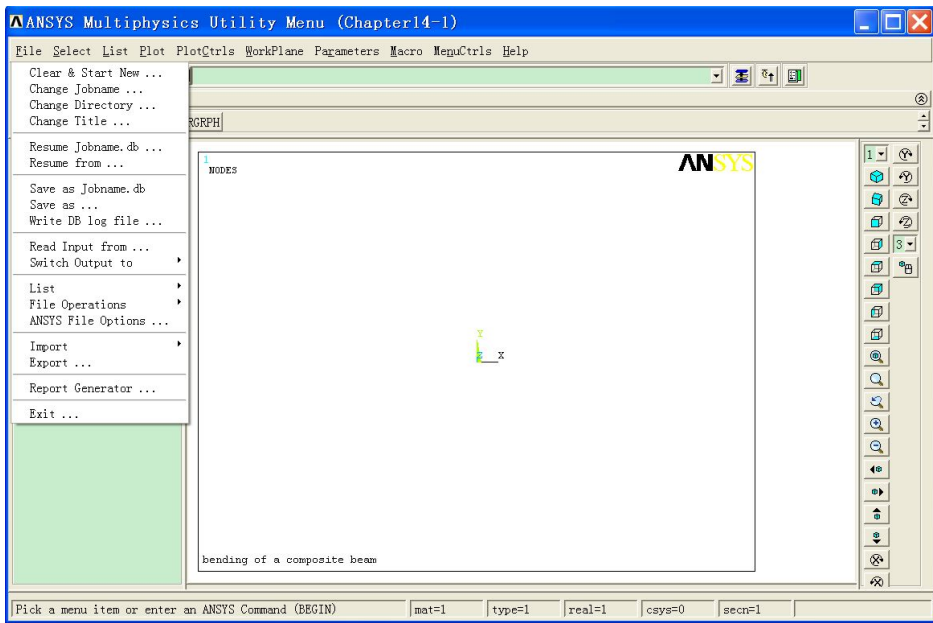


图 13.9 定义文件工作路径、文件名和文件标题



文件工作路径、文件名和文件标题也可以在 ANSYS Product Launcher 中定义。

13.3.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 Main Menu→Preferences 命令, 在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选 Structural 复选框, 过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令, 弹出 Element

Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Shell→Linear Layer 99 单元，即 SHELL99 单元，如图 13.10 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Element Types 对话框中的 Options 按钮，弹出 SHELL99 element type options 对话框，如图 13.11 所示，采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

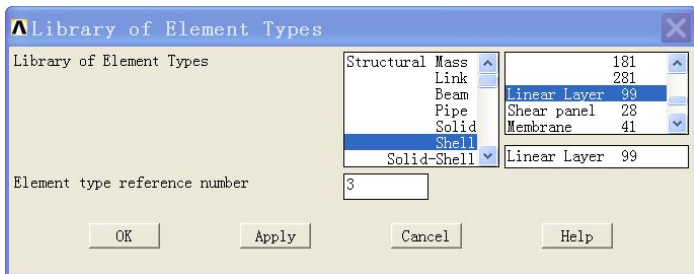


图 13.10 Library of Element Types 对话框

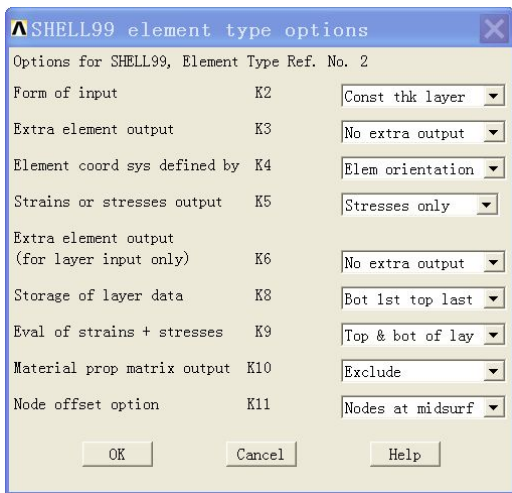


图 13.11 SHELL99 element type options 对话框

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，如图 13.12 所示设置参数，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

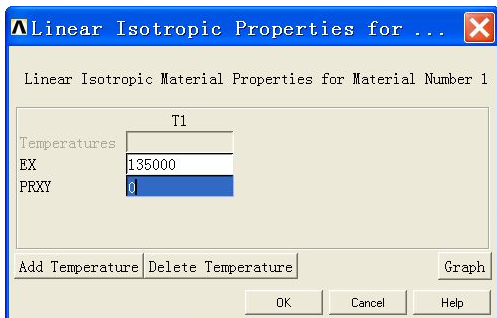


图 13.12 材料属性定义对话框

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，弹出如图 13.13 所示的对话框，单击 OK 按钮，弹出如图 13.14 所示的对话框，设置实常数编号（默认为 1）单击 OK 按钮，弹出如图 13.15 所示的对话框，设置复合材料层合单元铺层数及对称性。本例中，Number of layers（铺层数）为 6，Layer Symmetry Key 设为 1（其他值表示不对称）。单击 OK 按钮，弹出如图 13.16 所示的对话框，设置铺层参数，包括材料（MAT）、铺层角度（THETA）和铺层厚度（TK）。由于本例中叠层板为对称铺层，其参数设置如图 13.16 所示。单击 OK 按钮，返回 Real Constants 设置界面，单击 Edit 按钮可对设置进行更改，单击 Close 按钮完成实常数设置。



图 13.13 选择需定义实常数的单元类型

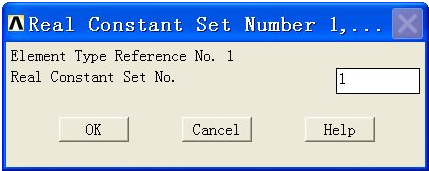


图 13.14 实常数编号设置对话框

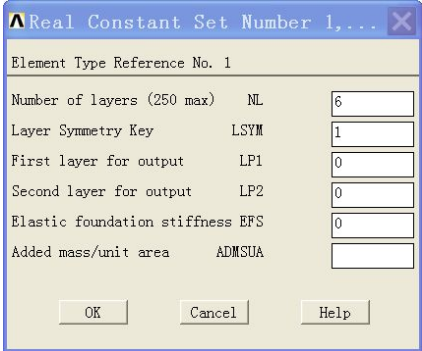


图 13.15 定义铺层数 and 对称性

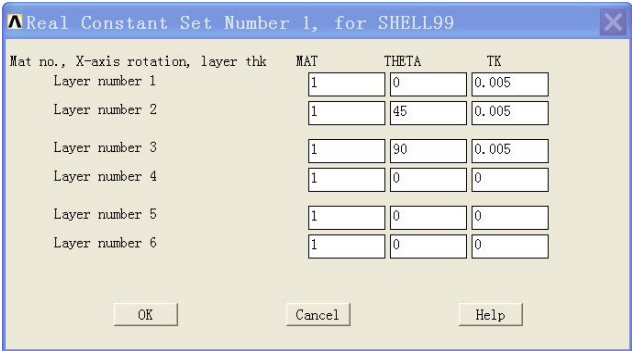


图 13.16 铺层参数设置

step 5 选择 ANSYS Toolbar→SAVE_DB 命令，保存上述操作过程。

13.3.2.3 创建几何模型

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions 命令，弹出 Create Rectangle by Dimensions 对话框，参数设置如图 13.17 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框，矩形面显示如图 13.18 所示。

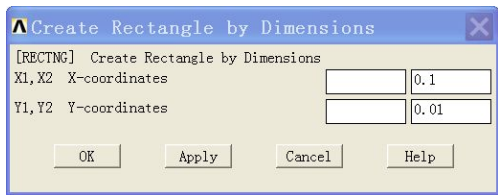


图 13.17 创建矩形面对话框



图 13.18 生成的矩形面显示

step 2 选择 ANSYS Toolbar→SAVE_DB 命令，保存上述操作过程。

13.3.2.4 网格划分

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 命令，弹出 MeshTool 对话框，如图 13.19 所示。在 Element Attributes 栏的下拉列表框中选择 Aera 选项，单击 Set 按钮，弹出 Meshing Attributes 对话框，设置网格划分的单元类型编号、材料编号、实常数编号、单元坐标系统编号和截面编号，本例中的具体设置如图 13.20 所示。单击 OK 按钮，关闭 Meshing Attributes 对话框。



图 13.19 MeshTool 对话框

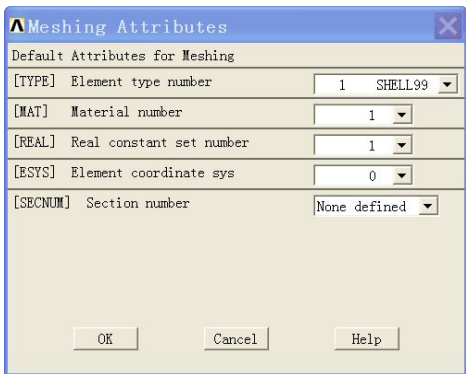


图 13.20 Meshing Attributes 对话框

step 2

回到 MeshTool 对话框, 在 Size Controls 栏的 Lines 组中单击 Set 按钮, 设置单元线段尺寸, 弹出线拾取对话框, 选择矩形面的两条短边, 单击 OK 按钮, 弹出 Element Sizes on Picked Lines 对话框, 参数设置如图 13.21 所示。其中, SIZE 和 NDIV 分别表示线段划分的尺寸和数量, 只需设置其中一项即可, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

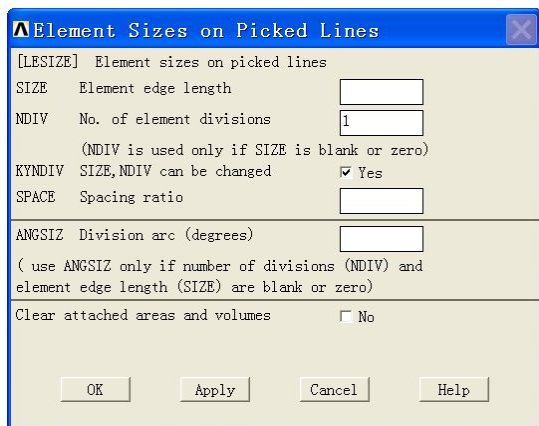


图 13.21 Element Sizes on Picked Lines 对话框

step 3

回到 MeshTool 对话框, 在 Mesh 下拉列表框中选择 Areas 选项, 在 Shape 栏中选择 Quad、Mapped 和 3 or 4 sided 选项, 如图 13.19 所示。单击 Mesh 按钮, 弹出网格划分面选择对话框, 选择矩形面, 单击 OK 按钮, 网格划分结果如图 13.22 所示。

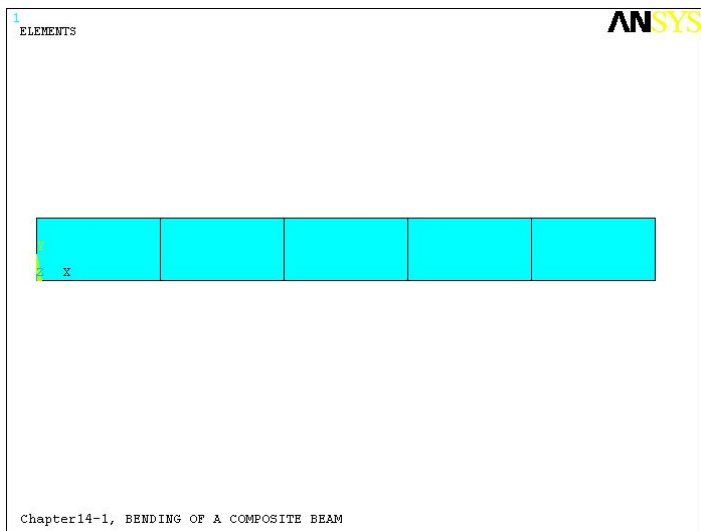


图 13.22 网格划分结果



网格划分完之后, 可以查看单元铺层结构, 选择 Utility Menu→Plot→Layered Elements 命令, 弹出单元拾取对话框, 如图 13.23 所示。选择单元 1, 单击 OK 按钮, 弹出如图 13.24 所示的对话框, 设置要查看的单元铺层范围, 单击 OK 按钮, 结果如图 13.25 所示。另外, 需要注意的是铺层编号是从底部开始的。

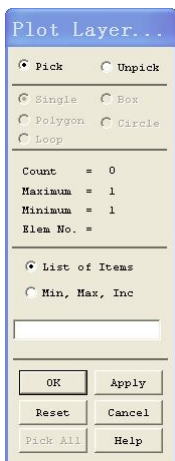


图 13.23 单元拾取对话框

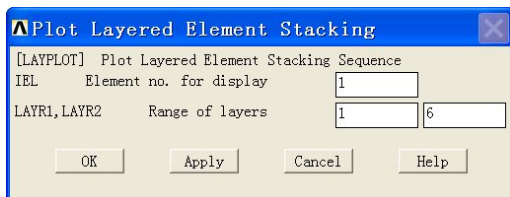


图 13.24 单元铺层结构绘制设置对话框

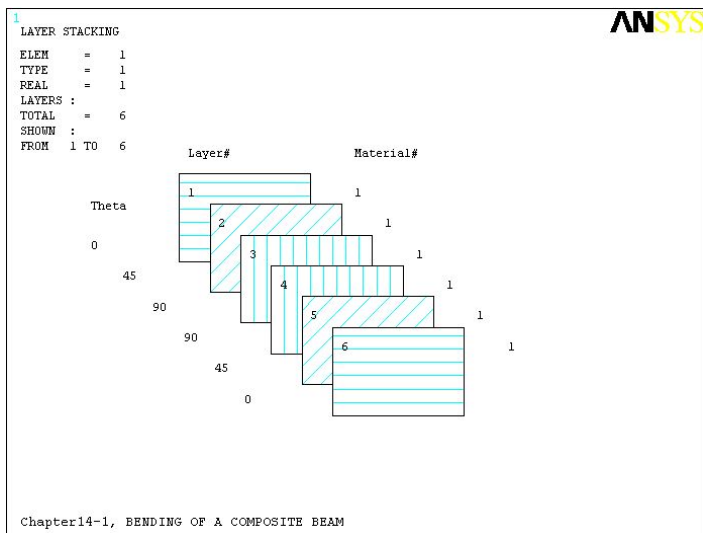


图 13.25 单元铺层结构显示结果

step 4

网格划分质量检查。选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Check Mesh→Individual Elm→Plot Warning/Error Elements 命令，弹出如图 13.26 所示的对话框，采用默认设置，单击 OK 按钮进行网格划分质量检查。检查完后，弹出如图 13.27 所示的对话框，提示没有网格划分错误。如网格划分有问题，ANSYS 将绘出错误位置。

step 5

选择 ANSYS Toolbar→SAVE_DB 命令，保存上述操作过程。

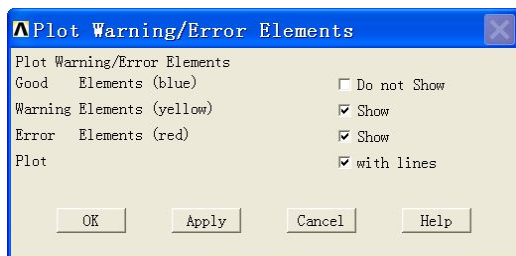


图 13.26 网格划分质量检查设置对话框

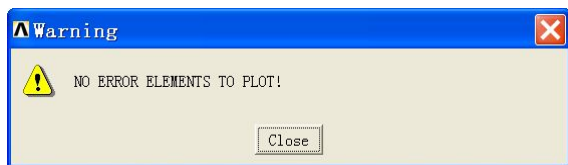


图 13.27 网格划分质量检查结果对话框

13.3.2.5 加载求解

step 1

选择 **Main Menu→Preprocessor→Coupling/Ceqn→Couple DOFs** 命令，弹出拾取对话框，如图 13.28 所示，选择 **Box** 单选按钮进行多点拾取，选择本例中悬臂板自由端的所有节点，单击 **OK** 按钮，弹出节点自由度耦合选项设置对话框，如图 13.29 所示，设置编号和耦合自由度，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

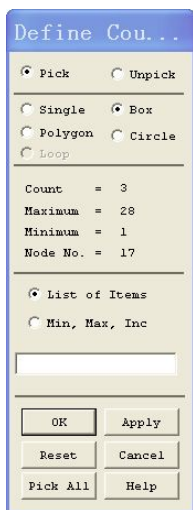


图 13.28 节点拾取对话框



图 13.29 节点自由度耦合选项设置对话框



该操作可使具有耦合自由度的节点在耦合自由度上具有相同的改变量。

step 2

选择 **Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines** 命令，弹出 **Apply U,ROT on Lines** 拾取菜单，用鼠标拾取本例悬臂板固定端的所有节点，单击 **OK** 按钮，弹出 **Apply U,ROT on Lines** 对话框。选择 **All DOF** 选项，限制该处节点所有自由度，如图 13.30 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 3

选择 **Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas** 命令，弹出 **Apply PRES on areas** 拾取菜单，用鼠标拾取矩形面，单击 **OK** 按钮，弹出 **Apply PRES on areas** 对话框，参数设置如图 13.31 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。约束及加载后的结果如图 13.32 所示。

step 4

选择 **Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框。选择分析类型为 **Static**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

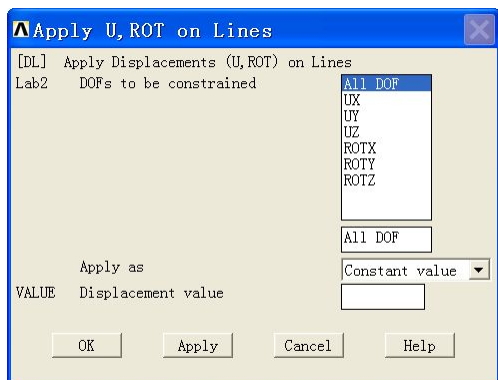


图 13.30 Apply U, ROT on Lines 对话框

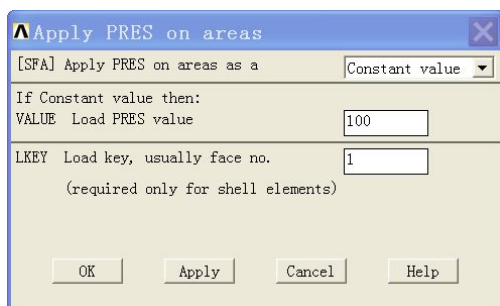


图 13.31 Apply PRES on areas 对话框

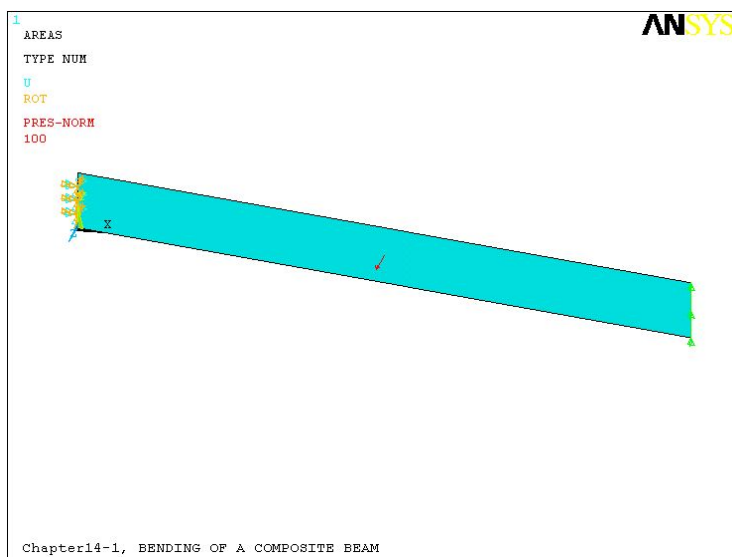


图 13.32 约束及加载后的结果

step 5 选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 /STATUS Command 对话框和 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，弹出 Note 对话框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

step 6 选择 ANSYS Toolbar→SAVE_DB 命令，保存上述操作过程。

13.3.2.6 查看求解结果

step 1 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框。在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的轮廓，如图 13.33 所示。

step 2 选择 Main Menu→General Postproc→Options for Outp 命令，弹出 Options for Output 对话框，如图 13.34 所示，输出结果默认为顶层的输出结果，若想获得其他铺层结果，可以通过设置[SHELL]和[LAYER]两栏的参数得到。

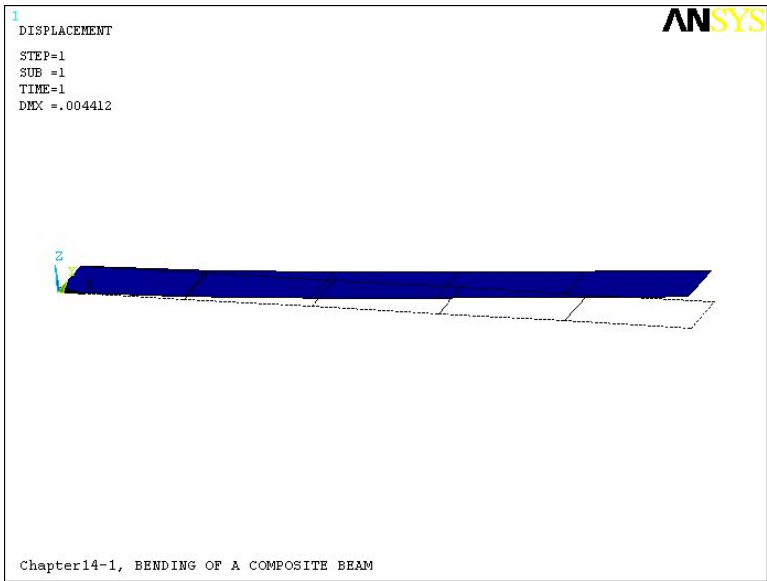


图 13.33 变形后的几何形状和未变形的轮廓

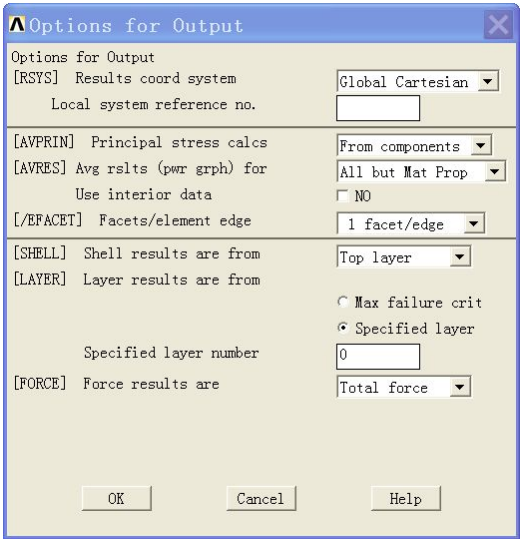


图 13.34 Options for Output 对话框

- step 3
- 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→Stress→von Mises stress 选项，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 13.35 所示的 von Mises 等效应力场分布等值线图。
- step 4
- 在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→Stress→X-Component stress 和 Nodal Solution→DOF Solution→Z-Component of displacement 选项，结果分别如图 13.36 和图 13.37 所示。

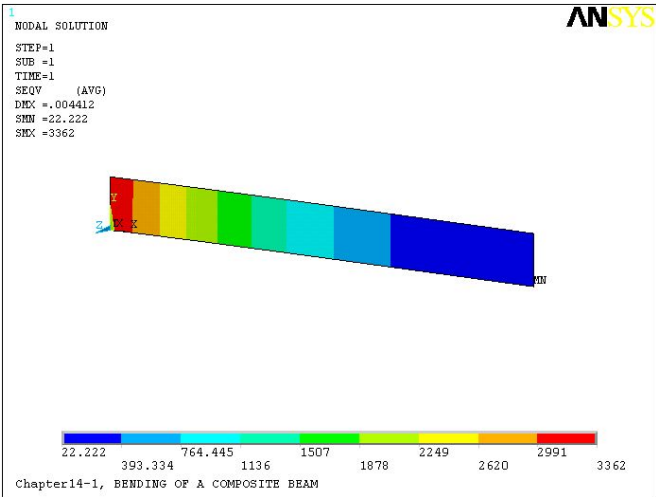


图 13.35 von Mises 等效应力场分布等值线图

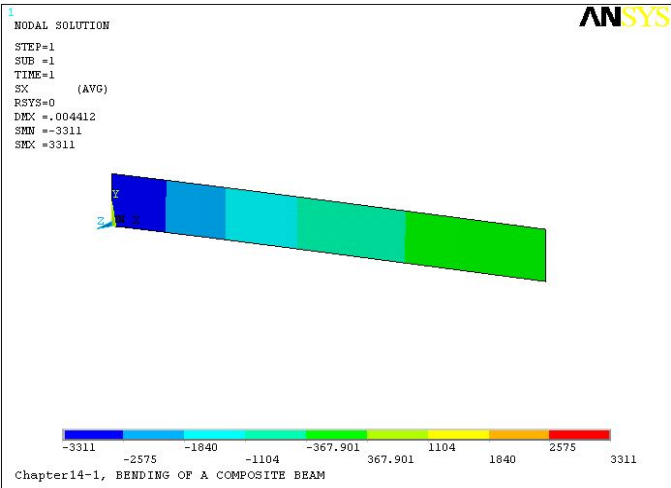


图 13.36 X-Component stress 分布等值线图

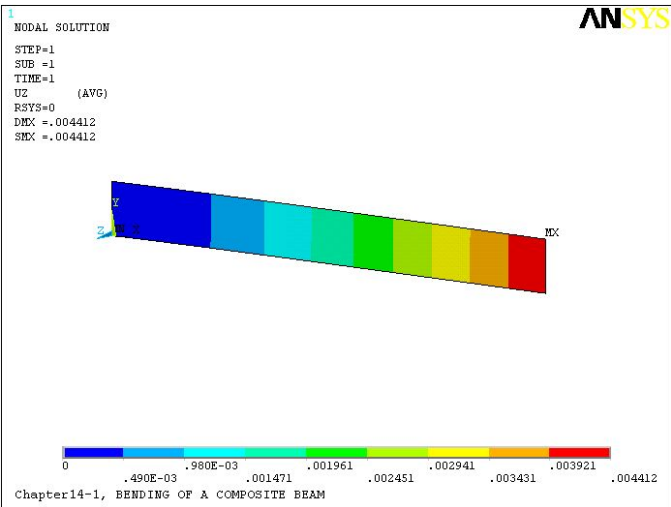


图 13.37 Z-Component of displacement 分布等值线图

step 5 选择 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution 命令,弹出 List Nodal Solution 对话框。在 Item to be listed 列表框中依次展开 Nodal Solution→Stress→von Mises stress 选项,其余选项采用默认设置,单击 OK 按钮,ANSYS 显示窗口将显示如图 13.38 所示的 von Mises 等效应力计算结果。

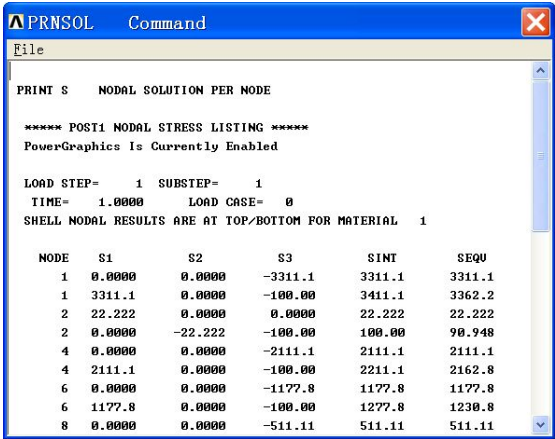


图 13.38 von Mises 等效应力计算结果



同理,选择 Nodal Solution→Stress→X-Component stress 和 Nodal Solution→DOF Solution→Z-Component of displacement 命令可查看其计算结果。另外,若要查看叠层板底层输出结果,只需在图 13.34 中的[SHELL]下拉列表框中选中 Bottom Layer 选项并按上述方法进行查看即可。

step 6 选择 Utility Menu→File→Exit 命令,弹出 Exit from ANSYS 对话框,选择 Save Everything 单选按钮,单击 OK 按钮,关闭 ANSYS 程序。

13.3.3 APDL 命令流求解过程

本例的 APDL 命令流求解程序如下。

```
! 先建立几何模型,再划分有限单元求解方法
/CLEAR
/PREP7                                     ! 进入前处理器
/TITLE, Chapter13-1, BENDING OF A COMPOSITE BEAM ! 设置标题名
C*** USING LAYERED SHELL ELEMENT SHELL99      ! 说明性文字
ET,1,SHELL99                                ! 定义 8 节点层合壳单元
R,1,6,1                                     ! 定义实常数
RMORE                                     ! 定义单层参数
RMORE,1,0,.005,1,45,.005                 ! LAYER 1:1 MAT,0.005 THK;
! LAYER 2:1 MAT,0.005 THK;
RMORE,1,90,.005                           ! LAYER 3:1 MAT,0.005 THK;
MP,EX,1,1.35E5                             ! 定义材料属性
MP,NUXY,1,0
! 建立几何模型
N,1                                         ! 定义节点
```



```

N,3,,0.01
FILL
NGEN,11,3,1,3,,.01
NDELE,5,29,6
E,1,7,9,3,4,8,6,2          ! 定义单元
EGEN,5,6,-1
CP,1,ROTY,31,32,33          ! 定义自由度耦合节点
FINISH

/SOLU                        ! 进入求解器
ANTYPE,STATIC                ! 定义求解类型
OUTPR,,1                     ! 定义输出内容
NSEL,S,LOC,X,0
D,ALL,ALL                    ! 固定端约束
ALLSEL,ALL
SF,ALL,PRES,100              ! 均布载荷加载
SOLVE                        ! 求解
FINISH

/POST1                       ! 进入后处理器
NSEL,S,LOC,X,0.1
PRNSOL,U,Z                   ! 输出自由端 Z 向位移
*GET,Udisplacement,NODE,31,U,Z
NSEL,S,LOC,Y
SHELL,TOP                    ! 定义计算结果来自 SHELL 的顶层
PRNSOL,S,COMP                ! 输出顶层应力计算结果
*GET,Stresstop,NODE,1,S,X
SHELL,BOT
PRNSOL,S,COMP
*GET,Stressbottom,NODE,1,S,X
FINISH
! 直接生产节点和有限单元求解方法
/CLEAR
/PREP7                        ! 进入前处理器
/TITLE, Chapter13-1, BENDING OF A COMPOSITE BEAM ! 设置标题名
C***    USING LAYERED SHELL ELEMENT SHELL99      ! 说明性文字
ET,1,SHELL99                 ! 定义 8 节点层合壳单元
R,1,6,1                      ! 定义实常数
RMORE                        ! 定义单层参数
RMORE,1,0,.005,1,45,.005    ! LAYER 1:1 MAT,0.005 THK;
! LAYER 2:1 MAT,0.005 THK;
RMORE,1,90,.005              ! LAYER 3:1 MAT,0.005 THK;
MP,EX,1,1.35E5               ! 定义材料属性
MP,NUXY,1,0
! 建立几何模型
RECTNG,,0.1,,0.01           ! 定义节点
LESIZE,1,0.02                ! 定义网格划分尺寸
LESIZE,3,0.02
LESIZE,2,0.01
LESIZE,4,0.01
MSHAPE,0                      ! 定义单元形状

```

```
MSHKEY,1                                ! 定义映射网格划分
AMESH,1
NSEL,S,LOC,X,0.1
CP,1,ROTY,ALL                            ! 定义自由度耦合节点
ALLSEL,ALL
FINISH

/SOLU                                    ! 进入求解器
ANTYPE,STATIC                            ! 定义求解类型
OUTPR,,1                                ! 定义输出内容
NSEL,S,LOC,X,0
D,ALL,ALL                                ! 固定端约束
ALLSEL,ALL
SF,ALL,PRES,100                          ! 均布载荷加载
SOLVE                                    ! 求解
FINISH

/POST1                                  ! 进入后处理器
NSEL,S,LOC,X,0.1
PRNSOL,U,Z                              ! 输出自由端 Z 向位移
*GET,Udisplacement,NODE,2,U,Z
NSEL,S,LOC,Y
SHELL,TOP                                ! 定义计算结果来自 SHELL 的顶层
PRNSOL,S,COMP                            ! 输出顶层应力计算结果
*GET,Stresstop,NODE,1,S,X
SHELL,BOT
PRNSOL,S,COMP
*GET,Stressbottom,NODE,1,S,X
FINISH
```

13.4 复合材料结构分析实例详解 2：复合材料四边简支板模态分析

本节介绍复合材料四边简支板的模态分析过程。

13.4.1 问题描述与分析

如图 13.39 所示的四边简支复合材料叠层方板，边长为 8m，厚为 0.04m，密度为 $2.16\text{g}/\text{cm}^3$ 。叠层板共 8 层，铺层为 $[0/45/-45/90]_s$ ，单层厚度为 0.005m，各层材料属性和厚度均相同，其中 $E_x = 25 \times 10^6 \text{ N}/\text{m}^2$ ， $E_y = 1 \times 10^6 \text{ N}/\text{m}^2$ ， $\nu_{xy} = 0.25$ ， $G_{xy} = G_{xz} = 0.5 \times 10^6 \text{ N}/\text{m}^2$ ， $G_{yz} = 0.2 \times 10^6 \text{ N}/\text{m}^2$ ，试对其进行模态分析。

本例采用 8 节点 SOLID46 实体单元进行建模分析，并假设 $E_z = E_y$ 。



ANSYS 中，SOLID46 单元用于分析叠层壳或实体，其几何模型必须具有一定厚度。另外，SOLID46 单元只有 3 个方向的平移自由度，其分析精度低于 SHELL99 单元。但 SOLID46 可以用于分析结构表面的层间切应力，而 SHELL99 是建立 在无表面层间切应力基础上的，不能计算结构表面的层间切应力。

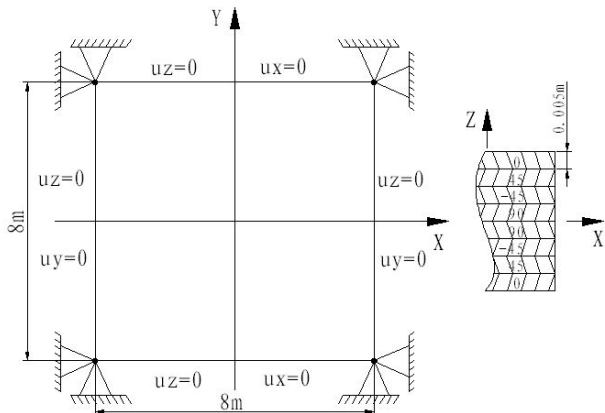


图 13.39 四边简支复合材料叠层板示意图

13.4.2 GUI 图形化求解过程

13.4.2.1 定义工作环境

step 1

直接启动 ANSYS, 进入 ANSYS Multiphysics Utility Menu 界面, 利用 File 菜单下的 Change Directory、Change Jobname 和 Change Title 命令分别定义文件工作路径、文件名和文件标题。

13.4.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1

选择 Main Menu→Preferences 命令, 在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框, 过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令, 弹出 Element Types 对话框, 单击 Add 按钮, 弹出 Library of Element Types 对话框, 在 Library of Element Types 列表框中选择 Solid→layered46 单元, 即 SOLID46 单元, 单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Options 按钮, 弹出 SOLID46 element type options 对话框, 如图 13.40 所示, 保持默认设置。单击 OK 按钮, 弹出 More SOLID46 element type options 对话框, 如图 13.41 所示, 保持默认设置, 单击 OK 按钮关闭对话框, 单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

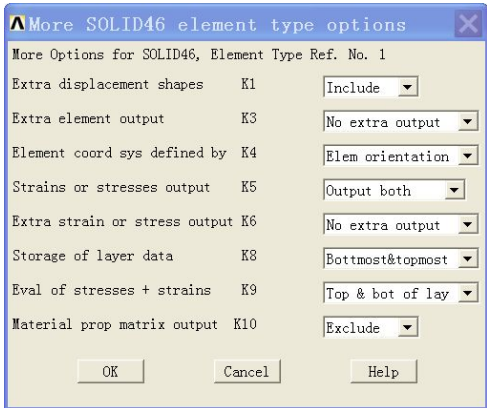
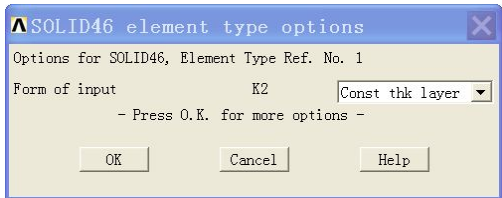


图 13.40 SOLID46 element type options 对话框

图 13.41 More SOLID46 element type options 对话框



通过图 13.40 和图 13.41 所示的两个对话框可以设置 SOLID46 单元的 key options 值，定义相应的输入/输出选项。

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→orthotropic 选项，弹出 Linear orthotropic Properties for Material Number 1 对话框，参数设置如图 13.42 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Density 选项，弹出 Density for Material Number 1 对话框，参数设置如图 13.43 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

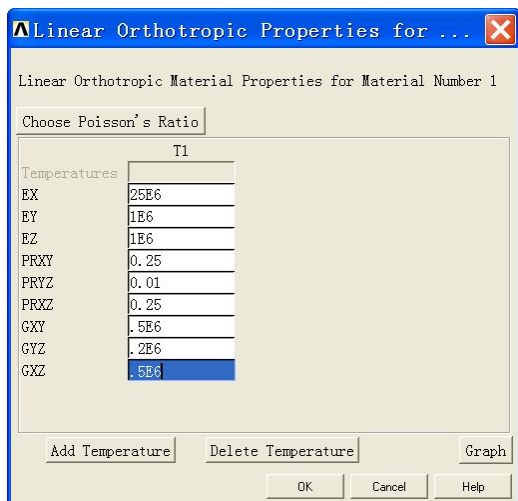


图 13.42 Linear Orthotropic Properties for Material Number 1 对话框

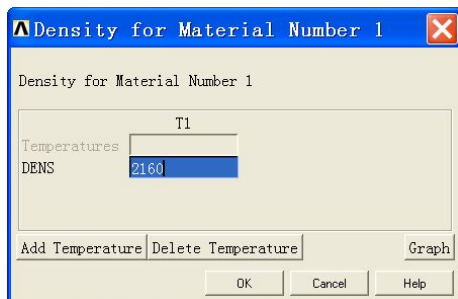


图 13.43 Density for Material Number 1 对话框

step 4

选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，选择 SOLID46 单元，单击 OK 按钮，弹出如图 13.44 所示的对话框，设置实常数编号（默认为 1）。单击 OK 按钮，弹出如图 13.45 所示的对话框，设置铺层数及对称性，本例中 Number of layers（铺层数）为 8，Layer Symmetry Key 设为 1（其他值表示不对称）。单击 OK 按钮，弹出如图 13.46 所示的对话框，设置铺层参数，包括材料（MAT）、铺层角度（THETA）和铺层厚度（TK）。单击 OK 按钮，返回 Real Constants 对话框，单击 Close 按钮完成实常数设置。



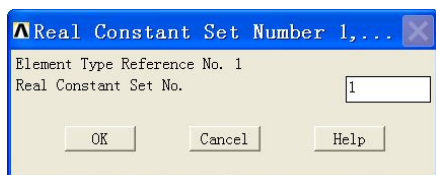


图 13.44 设置编号

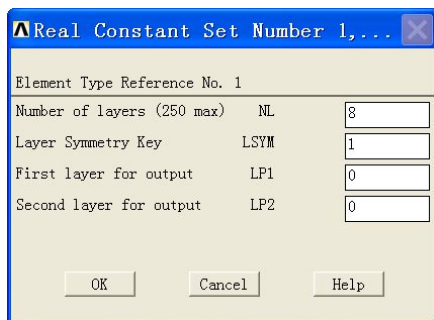


图 13.45 定义铺层数 and 对称性

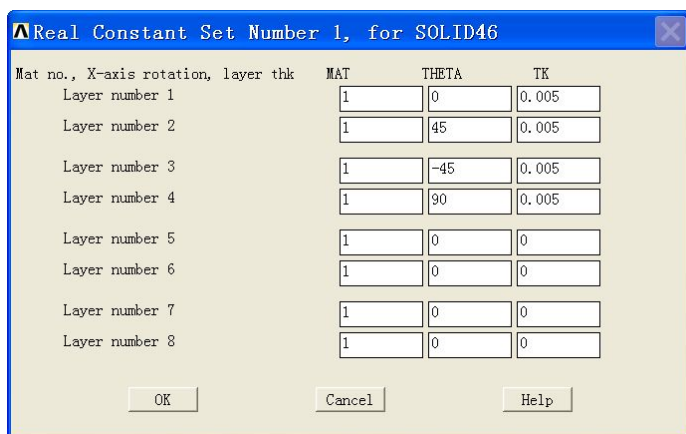


图 13.46 铺层参数设置

step 5 选择 ANSYS Toolbar→SAVE_DB 命令，保存上述操作过程。

13.4.2.3 创建几何模型

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions 命令，弹出 Create Block by Dimensions 对话框，参数设置如图 13.47 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

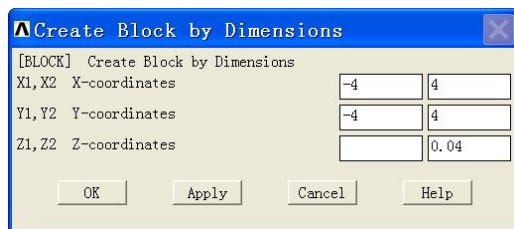


图 13.47 Create Block by Dimensions 对话框

step 2 选择 Utility Menu→PlotCtrls→View Setting→Viewing Direction 命令，弹出 Viewing Direction 对话框，参数设置如图 13.48 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。此时，ANSYS 显示窗口显示如图 13.49 所示的生成块体的结果。

step 3 选择 ANSYS Toolbar→SAVE_DB 命令，保存上述操作过程。

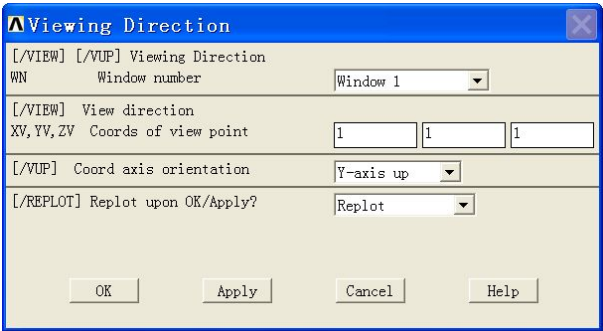


图 13.48 Viewing Direction 对话框

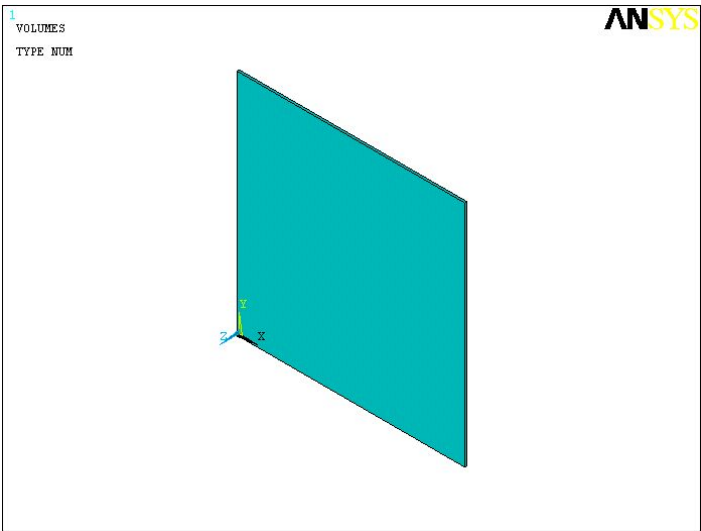


图 13.49 生成块体的结果

13.4.2.4 划分网格

- step 1
- 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs 命令，弹出 Meshing Attributes 对话框，采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。
- step 2
- 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Size 命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，参数设置如图 13.50 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

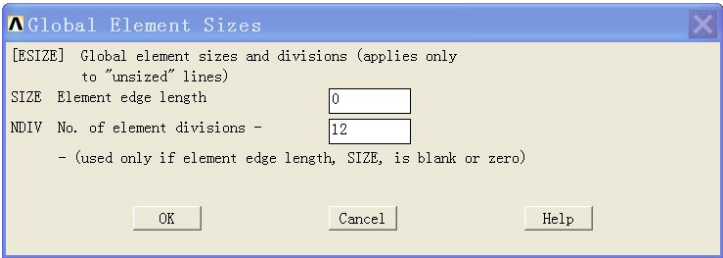


图 13.50 Global Element Sizes 对话框



注意，该处 ESIZE 命令设置的是整体在网格划分时的线单元的尺寸，当对同一对象再利用其他命令进行网格划分设置时将覆盖该命令。

step 3

选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 命令，弹出线段拾取对话框，选择块体的 4 条短边，单击 OK 按钮，弹出单元尺寸设置对话框，参数设置如图 13.51 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

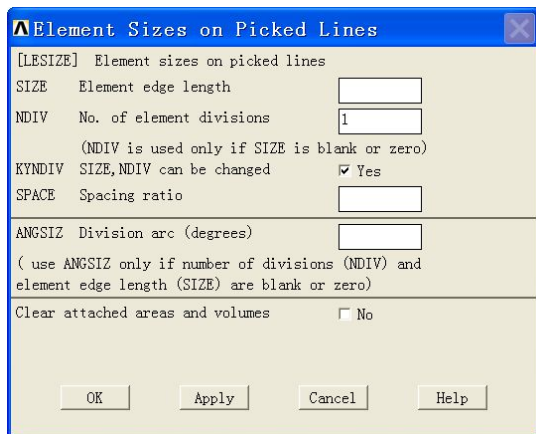


图 13.51 单元尺寸设置对话框

step 4

选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→4 to 6 sided 命令，弹出 Mesh Volumes 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口中选择块体，单击 OK 按钮关闭菜单。网格划分结果如图 13.52 所示。

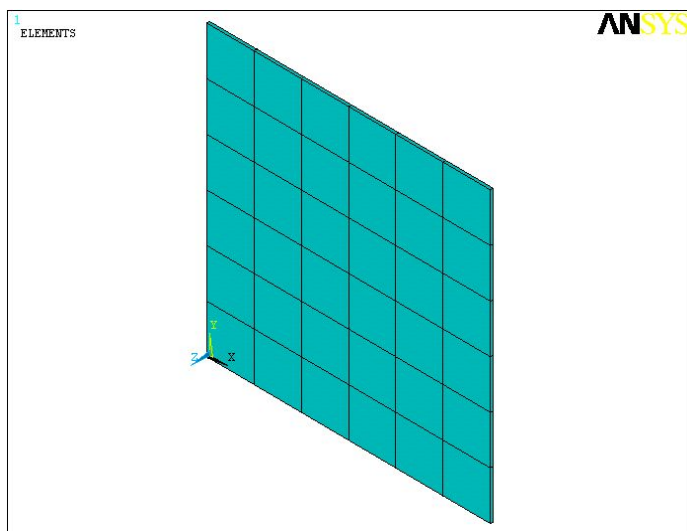


图 13.52 网格划分结果

step 5

选择 ANSYS Toolbar→SAVE_DB 命令，保存上述操作过程。

13. 4. 2. 5 加载求解

- step 1
- 选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Modal，单击 OK 按钮关闭该对话框。
- step 2
- 选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 命令，弹出 Modal Analysis 对话框，参数设置如图 13.53 所示。单击 OK 按钮，弹出 Block Lanczos Method 对话框，如图 13.54 所示，采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

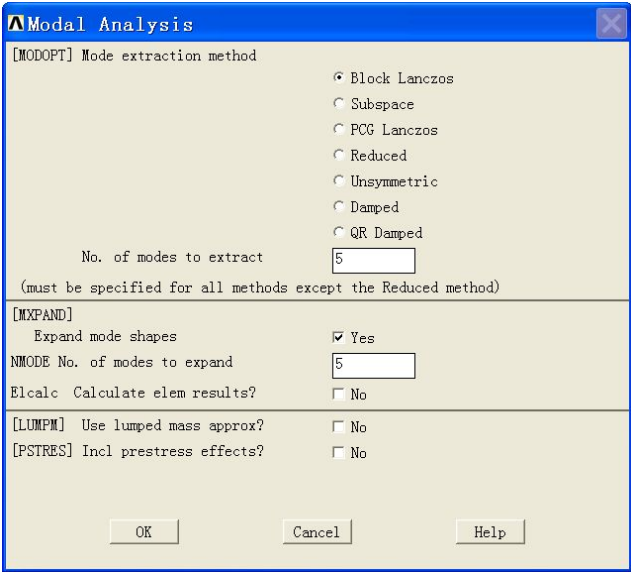


图 13.53 Modal Analysis 对话框

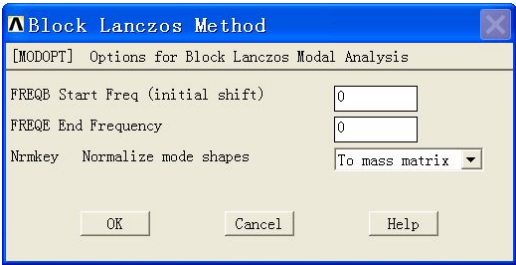


图 13.54 Block Lanczos Method 对话框

- step 3
- 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，拾取方式选择 Box，选择块体 X=-4 处的所有节点，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框。在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY 和 UZ 选项，如图 13.55 所示，单击 Apply 按钮。按照该方法依次定义 X=4 处的约束为 UY=0 和 UZ=0，Y=-4 和 Y=4 处的约束为 UX=0 和 UZ=0。定义完约束后的结果如图 13.56 所示。
- step 4
- 选择 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Out Ctrls→Solu Printout 命令，弹出 Solution Printout Controls 对话框，保持默认设置，如图 13.57 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

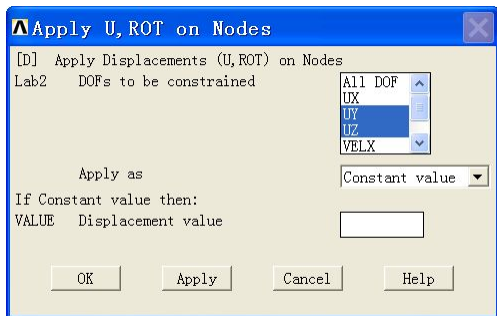


图 13.55 Apply U, ROT on Nodes 对话框

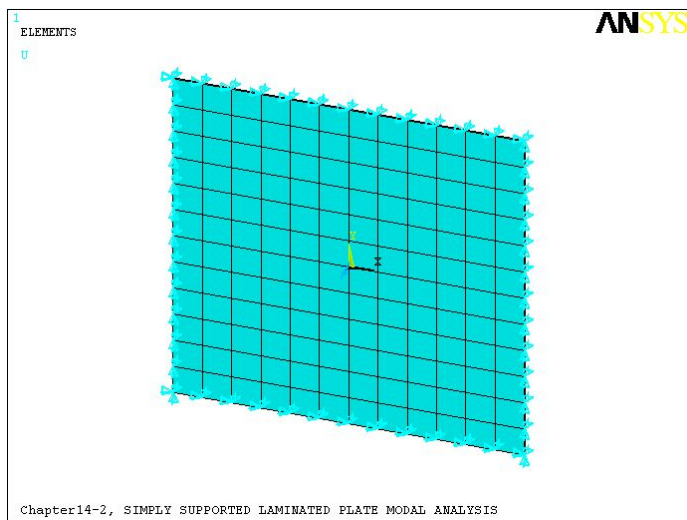


图 13.56 定义约束后的结果

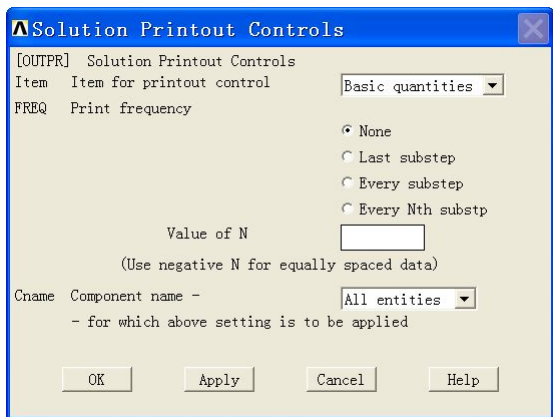


图 13.57 Solution Printout Controls 对话框

- step 5** 选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 /STATUS Command 和 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。
- step 6** 求解结束时，弹出 Note 对话框，单击 Close 按钮关闭该对话框。
- step 7** 选择 ANSYS Toolbar→SAVE_DB 命令，保存上述操作过程。

13. 4. 2. 6 查看求解结果

step 1 选择 Main Menu→General Postproc→Results Summary 命令，查看求解结果摘要，如图 13.58 所示。

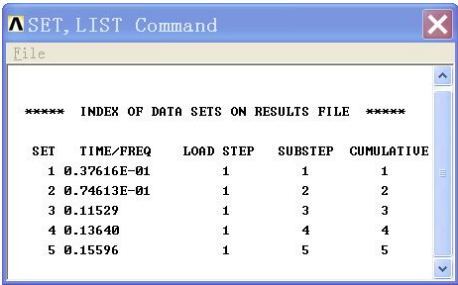


图 13. 58 求解结果摘要

step 2 选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→First Set 命令，读入一阶模态求解结果。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的轮廓，如图 13.59 所示。

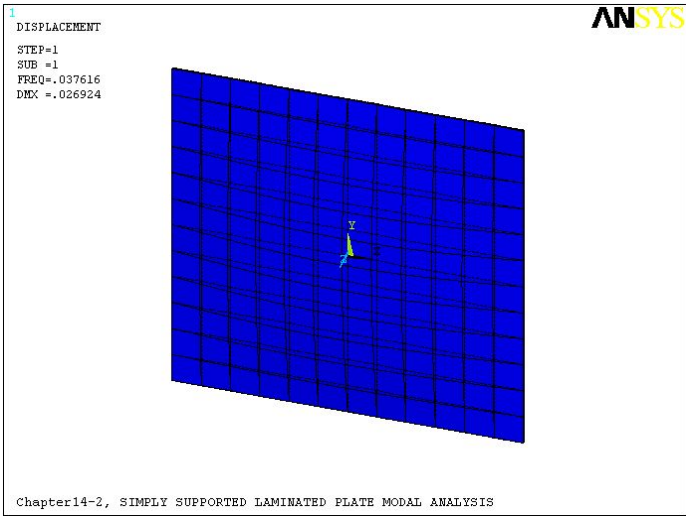


图 13. 59 变形后的几何形状和未变形的轮廓

step 3 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 13.60 所示的位移场分布等值线图。

step 4 选择 Main Menu→General Postproc→PlotCtrlsAnimate→Deformed Results 命令，弹出 Animate Nodal Solution Data 对话框，参数设置如图 13.61 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将以动画方式显示一阶模态振型，如图 13.62 所示，单击 Close 按钮关闭动画显示。

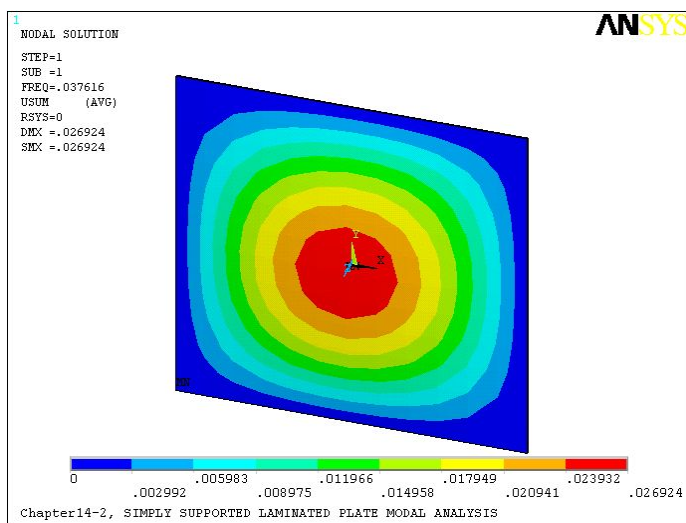


图 13.60 位移场分布等值线图

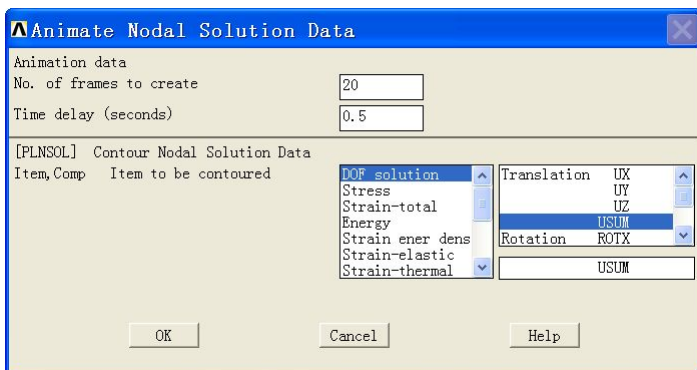


图 13.61 Animate Nodal Solution Data 对话框

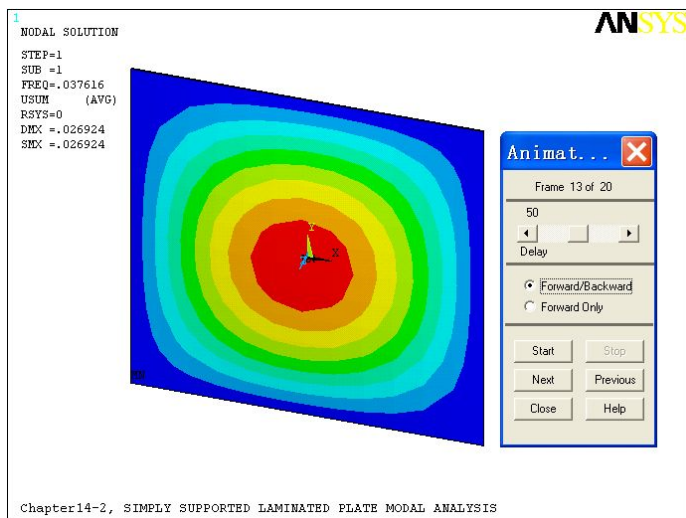


图 13.62 Animate Nodal Solution Data 动画显示窗口

step 5

选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→Next Set 命令可以读取下一模态求



解结果数据，按照上述方法可以查看相应的求解结果。

step 6

选择 **Utility Menu**→**File**→**Exit** 命令，弹出 **Exit from ANSYS** 对话框，选择 **Save Everything** 单选按钮，单击 **OK** 按钮，关闭 **ANSYS** 程序。

13.4.3 命令流

本例的 **APDL** 命令流求解程序如下。

```
/CLEAR, NOSTART
/FILNAME, Chapter13-2, MODAL ANALYSIS
/TITLE, Chapter13-2, SIMPLY SUPPORTED LAMINATED PLATE MODAL ANALYSIS
C*** USING SOLID46

/PREP7
ET,1,SOLID46                ! 定义单元类型为 SOLID46
R,1,8,1                     ! 定义铺层数为 8，对称铺层
RMORE
RMORE,1,0,0.005,1,45,0.005  ! 铺层 1 和铺层 2 参数
RMORE,1,-45,0.005,1,90,0.005 ! 铺层 1 和铺层 2 参数
MP,EX,1,25E6                ! 定义材料参数
MP,EY,1,1E6
MP,EZ,1,1E6                ! 假设 EZ=EY
MP,GXY,1,0.5E6
MP,GYZ,1,0.2E6
MP,GXZ,1,0.5E6
MP,PRXY,1,0.25
MP,PRYZ,1,0.01
MP,PRXZ,1,0.25
MP,DENS,1,2160              ! 密度
! 建模
BLOCK,-4,4,-4,4,0,0.04     ! 建立几何模型
/VIEW,,1,1,1
ESIZE,,12                  ! 控制总体网格划分尺寸
LSEL, S, LOC, X,-4         ! 定义厚度方向网格划分数为 1
LSEL, R, LOC, Y,-4
LESIZE, ALL,,, 1
LSEL, S, LOC, X,4
LSEL, R, LOC, Y,4
LESIZE, ALL,,, 1
LSEL, S, LOC, X,4
LSEL, R, LOC, Y,-4
LESIZE, ALL,,, 1
LSEL, S, LOC, X,4
LSEL, R, LOC, Y,4
LESIZE, ALL,,, 1
ALLSEL, ALL
VMESH, 1                    ! 网格划分
FINISH

/SOLU                      ! 进入求解器
```



```

ANTYPE, MODAL          ! 定义分析类型为模态分析
MODEOPT, LANB, 5       ! 定义模态参数提取方法为 BLOCK LANCZOS 法, 提取前 5 阶
MXPAND, 5              ! 定义模态扩展数为 5 阶
OUTPR, , 1
NSEL, S, LOC, X, 4     ! 定义约束
D, ALL, UZ, , , , , UY
NSEL, S, LOC, X, -4
D, ALL, UZ, , , , , UY
NSEL, S, LOC, Y, 4
D, ALL, UZ, , , , , UX
NSEL, S, LOC, Y, -4
D, ALL, UZ, , , , , UX
SOLVE                  ! 求解
FINISH

/POST1                 ! 进入后处理器, 查看求解结果
SET, LIST, 2           ! 查看求解结果摘要
SET, FIRST             ! 读取一阶模态求解结果
PLDISP, 0              ! 图形显示一阶模态振型
ANMODE, 10, .5E-1      ! 动画显示一阶模态振型
SET, NEXT              ! 读取下一阶模态求解结果 (二阶模态)
PLDISP, 0
ANMODE, 10, .5E-1
SET, NEXT
PLDISP, 0
ANMODE, 10, .5E-1
SET, NEXT
PLDISP, 0
ANMODE, 10, .5E-1
SET, NEXT
PLDISP, 0
ANMODE, 10, .5E-1
FINISH
/EXIT                  ! 退出 ANSYS

```

13.5 小结

本章结合两个工程实例介绍了 ANSYS 复合材料结构分析的基本方法、步骤和过程, 并介绍了单元类型的选择、建模及后处理等多方面的内容。通过本章的学习, 希望读者对 ANSYS 复合材料结构分析有个基本的掌握, 并结合自己的工作需求进行更复杂的工程结构分析。



第 14 章 ANSYS 在机械工程中的应用

本章包括

- ◆ 实例详解 1：扳手的静力分析
- ◆ 实例详解 2：壳体零件的静力分析
- ◆ 实例详解 3：支架零件模态分析
- ◆ 实例详解 4：电机支架的拓扑结构优化设计

自有限元算法诞生后的 40 多年来，有限元法的应用已从弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题，从静力问题扩展到稳定性问题、动力问题，从固体力学问题扩展到流体力学、传热学、电磁学等领域，分析的对象从弹性材料扩展到塑性、粘弹性、粘塑性以及复合材料。工程问题的数值模拟技术的应用，推动了有限元软件的发展。在科技日新月异的今天，传统的产品开发模式正在发生根本性的变革。

ANSYS Workbench 作为 ANSYS 公司于 2002 年开发的新一代产品研发平台，不仅继承了 ANSYS 经典平台在有限元分析上的所有功能，而且融入了 UG、PRO/E、SolidWorks 等 CAD 软件强大的几何建模功能和 ISIGHT、BOSS 等优化软件在优化设计方面的优势，真正实现了集产品设计、仿真、优化于一体，可以帮助技术人员在同一软件环境下完成产品研发过程中的所有工作，有力地缩短了产品的开发周期。ANSYS Workbench 作为新一代多物理场协同 CAE 仿真环境，其独特的产品架构和众多支撑性产品开发模块为产品整机、多物理场耦合分析提供了优秀的解决方案。其主要包括 4 个模块：Analysis Systems，Component Systems，Custom Systems，Design Exploration 等。其中，Analysis Systems 模块提供了静力学分析、动力学分析、电场分析、磁场分析、热场分析以及流场分析等功能模块，另外还可实现形状优化等功能；Component Systems 模块主要由建模模块（Geometry）、网格划分模块（Mesh）、工程数据库（Engineering Data）以及二次开发模块（Mechanical APDL）等组成；Custom Systems 模块则是将常用的分析类型整合成为一个链接好的模块，如 Fluid Flow（CFX）仿真后的静态分析以及预应力的模态分析等，用户只需双击感兴趣的选项即可进入；Design Exploration 模块实现了对产品静态分析下的可靠性评估（Six Sigma Analysis）等功能。ANSYS Workbench 仿真平台的主要特色如下。

1. 强大的产品装配体自动分析功能

汽车、航空航天、电子类的产品零件众多、结构复杂，ANSYS Workbench 可以自动识别相邻零件并设置接触关系，大大节省了模型的建立时间，从而避免了手动设置装配体接触关系所造成的费时和容易出错的问题。此外，还为手动编辑接触表面或对现有接触指定接触类型提供了有力的工具。ANSYS Workbench 提供了与其他 CAD 软件完美的接口，可与 CAD 系统中的实体及参数双向链接，提高了 CAD 几何模型倒入成功率。当 CAD 模型改变时，只需在仿真界面下刷新模型，即可得到新的模型，无需重新设置载荷及约束条件，提高了设计的效率。

2. 网格自动划分功能

ANSYS Workbench 提供的自动网格划分技术根据不同的分析类型来进行网格的自动划分,对于精度要求高的区域会自动调整网格密度,从而提高网格的质量。另外,对于感兴趣的求解问题还可设置收敛的精度,以得到满意的结果。

3. 多物理场的耦合仿真分析

对于一个复杂的工程问题,往往在分析中要牵扯到诸多的物理场环境,这时就需要具有多物理场协同分析功能的软件,以更好地模拟实际的工况,得出准确的计算结果。ANSYS Workbench 为多物理场仿真分析提供了有力的计算平台。

4. 快捷的优化工具

仿真分析的目的是进行产品的优化以期得到更优越的性能。ANSYS Workbench 的优化功能主要包括参数优化和拓扑优化两部分,优化的参数可以是模型几何尺寸、结构形式、施加的边界条件等,既可以进行连续性参数和离散化参数优化,又可以进行单目标或多目标优化。

本书将通过实例对 ANSYS 软件在机械工程中的应用进行详解,重点在于 ANSYS Workbench 仿真平台的应用,以期对读者有所启发。

14.1 有限元分析实例详解 1: 扳手的静力分析

本节对机械工程中常用的工具——扳手的受力进行静力学分析。

14.1.1 问题描述与分析

如图 14.1 所示的扳手零件,厚度 3mm,材料弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{N/m}^2$,泊松比为 0.3。采用自底向上的建模方法,用 20 节点的 SOLID95 单元划分网格。

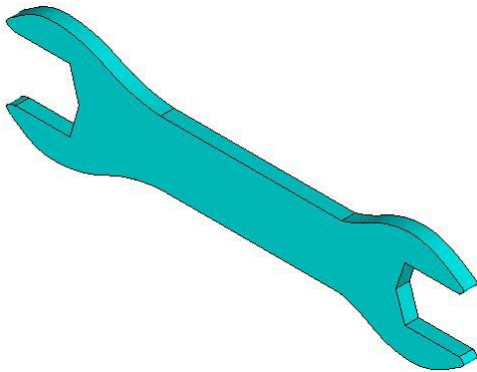


图 14.1 扳手零件示意图

14.1.2 求解过程

14.1.2.1 定义工作目录

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口,在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics/LS-DYNA,在 Working Directory 输入栏中输入工作目录:

C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 14\spanner, 单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

14.1.2.2 定义工作文件名和工作标题

step 1 定义工作文件名。选择 Utility Menu→File→Change Jobname 命令，在弹出的 Change Jobname 对话框中输入 Spanner，单击 OK 按钮。

step 2 定义工作标题。选择 Utility Menu→File→Change Title 命令，在弹出的 Change Title 对话框中输入 The stress analysis of spanner，单击 OK 按钮。

step 3 重新显示。选择 Utility Menu→Plot→Replot 命令。

14.1.2.3 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，如图 14.3 所示，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选择 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid 中的 Brick 20node 95 单元，如图 14.2 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

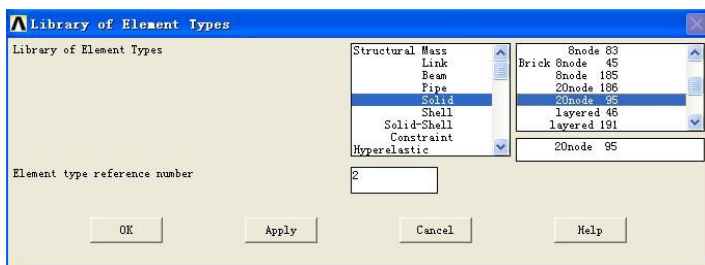


图 14.2 Library of Element Types 对话框

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Model Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.06E+005，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 14.3 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

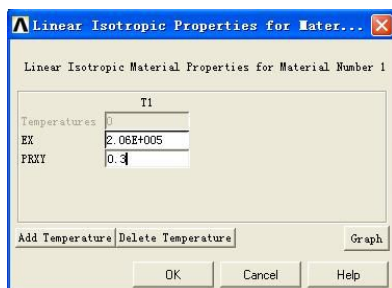


图 14.3 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 4 选择 **Utility Menu→File→Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

14.1.2.4 创建有限元模型

step 1 选择 **Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS** 命令，弹出 **Create Keypoints in Active Coordinate System** 对话框，在 **Keypoint number** 输入栏中输入 1，在 **X,Y,Z Location in active CS** 输入栏中输入 16、0、0，如图 14.4 所示，单击 **Apply** 按钮建立关键点 1，然后依次建立其他关键点，方法同上，关键点坐标见表 14.1。

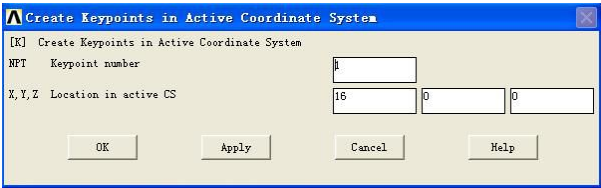


图 14.4 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

表 14.1 关键点编号及坐标

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
X 坐标	16	14	2	0	2	8	18	25	34	74	79	83	92	100	101	100	88	86
Y 坐标	0	7	7	8	10	13	12	9	7	7	9	11	12	8	7	6	6	0

step 2 所有关键点建立完之后，选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Numbering...** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，选中 **Keypoint Numbers** 复选框，**off** 变为 **on**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框，选择 **Utility Menu→Plot→Keypoints→Keypoints** 命令。此时，关键点在 **ANSYS** 窗口中的显示如图 14.5 所示。

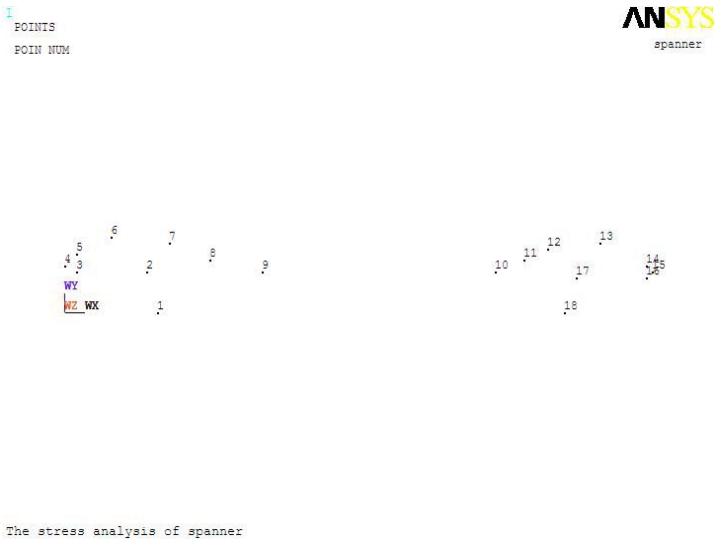


图 14.5 关键点结果显示

step 3 选择 **Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Straight Line** 命令，弹出 **Create Straight...** 拾取菜单，选取关键点 1，2，3，生成直线 L1，L2；选择 **Main Menu**

→Preprocessor→Modeling→Create→Splines→Spline thru KPs 命令，弹出 B-Spline 拾取菜单，依次选取关键点 3，4，5，6，7，8，9，单击 OK 按钮生成曲线 L3。按照上述方法，分别生成直线 L4，L6，L7，L8 以及曲线 L5。选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering...命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，选中 Line Numbers 复选框，off 变为 on，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Utility Menu→Plot→Lines 命令，生成的线条如图 14.6 所示。

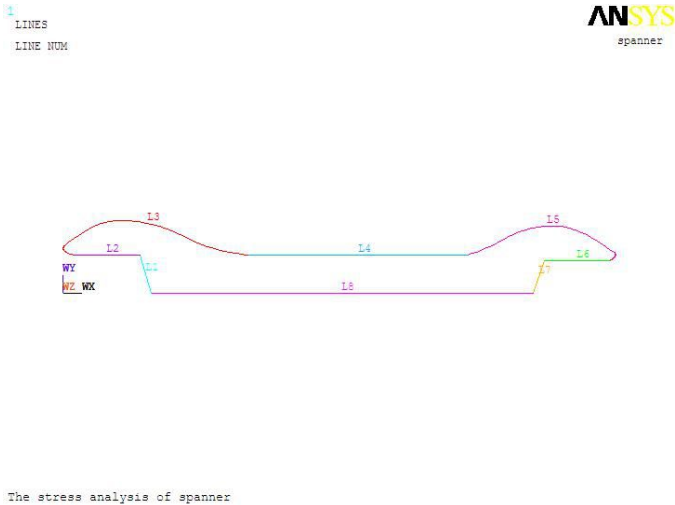


图 14.6 生成的线条

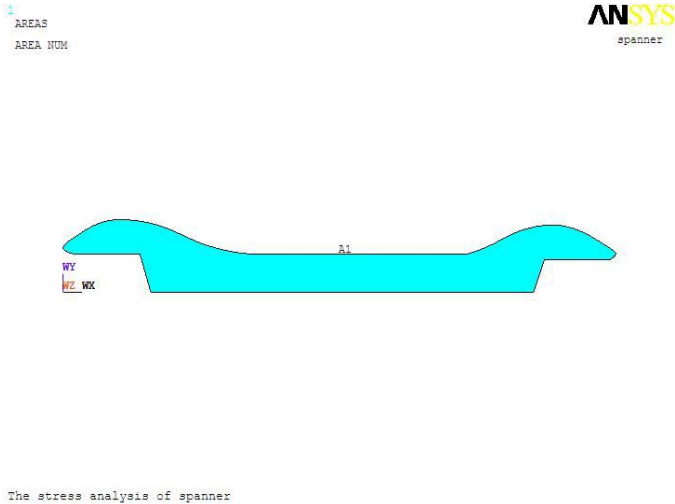


图 14.7 生成的平面

- step 4

生成平面。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines 命令，弹出 Create Area by L...拾取菜单，依次选取线 L1，L2，L3，L4，L5，L6，L7，L8，生成平面 A1。打开 Plot Numbering Controls 对话框，选中 Area Numbers 复选框，off 变为 on，单击 OK 按钮关闭该对话框。选择 Utility Menu→Plot→Areas 命令，生成的平面如图 14.7 所示。
- step 5

生成整个扳手的投影平面。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Areas

命令，弹出 Reflect Areas 拾取菜单，选取面 A1，弹出 Reflect Areas 对话框，在 Ncomp Plane of symmetry 栏中选择 X-Z plane Y 单选按钮，单击 OK 按钮，生成新的平面 A2，如图 14.8 所示。

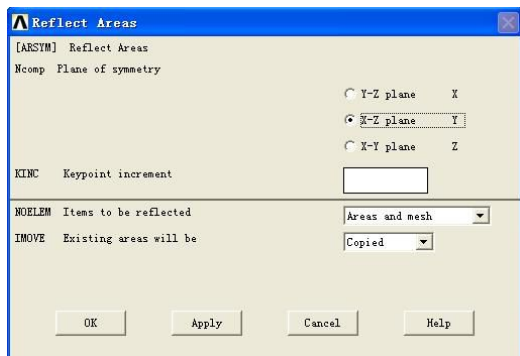
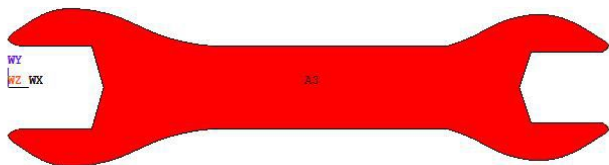


图 14.8 Reflect Areas 对话框

step 6 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Areas 命令，弹出 Add Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，再单击 OK 按钮，将面 A1, A2 相加生成新的平面 A3，如图 14.9 所示。

AREAS
AREA NUM

ANSYS
spanner



The stress analysis of spanner

图 14.9 合成新平面 A3

step 7 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Normal 命令，弹出 Extrude Areas by...拾取菜单，选择平面 A3，单击 OK 按钮，弹出 Extrude Area along Normal 对话框，在 Length of extrusion 输入栏中输入 3，如图 14.10 所示。拉伸得到的扳手零件实体如图 14.11 所示。

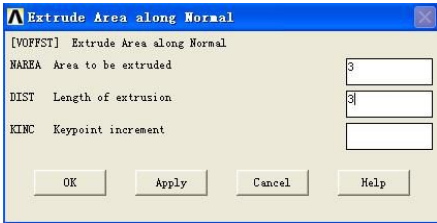
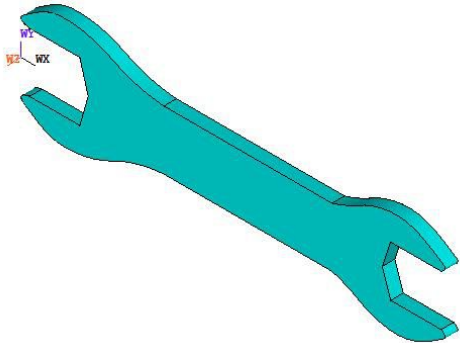


图 14.10 Extrude Area along Normal 对话框

1
VOLUMES
VOLU NUM



The stress analysis of spanner

图 14.11 拉伸得到的扳手零件实体

step 8 网格划分。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→MeshTool 命令，弹出 MeshTool 拾取菜单，选中 Smart Size 复选框，拖动滑块至显示数值 2 为止，如图 14.12 所示。单击 Size Control 栏中 Global 旁的 Set 按钮，打开 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE Element edge length 输入栏中输入 1，如图 14.13 所示，单击 OK 按钮，打开 Mesh Volumes 对话框，单击 Pick All 按钮生成网格，如图 14.14 所示。至此，已经完成了扳手零件的有限元模型的建立，单击 SAVE_DB 按钮进行保存。



图 14.12 MeshTool 拾取菜单

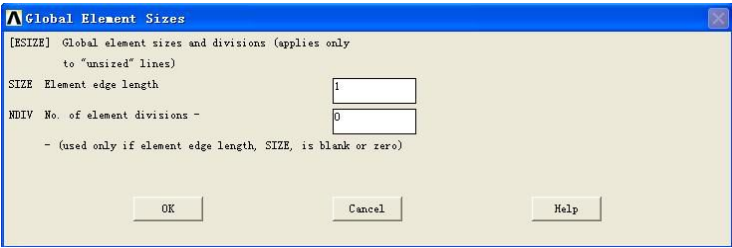


图 14.13 Global Element Sizes 对话框





The stress analysis of spanner

图 14.14 网格划分结果

14.1.2.5 加载求解

step 1 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas 命令，弹出 Apply U,ROT on Areas 拾取菜单，拾取面 A9, A12，单击 OK 按钮弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，如图 14.15 所示，在 DOFs to be constrained 栏中选择 All DOF 选项，单击 OK 按钮完成约束条件的设置，设置位移约束后的结果如图 14.16 所示。

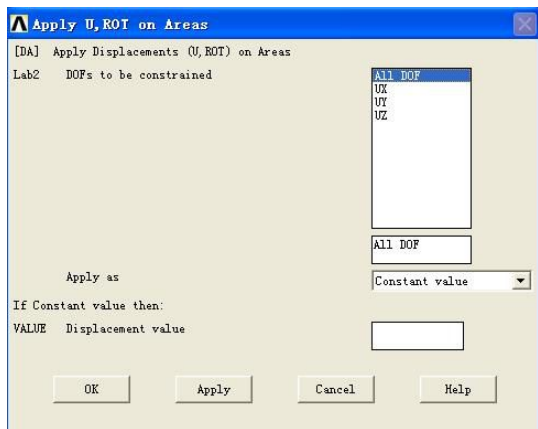


图 14.15 Apply U,ROT on Areas 对话框

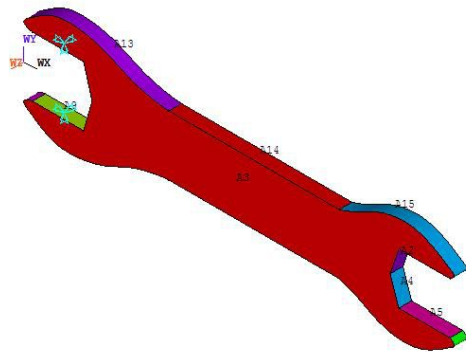
step 2 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas 命令，弹出 Apply PRES on Areas 拾取菜单，拾取面 A15，单击 OK 按钮，弹出 Apply PRES on areas 对话框，如图 14.17 所示，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮完成载荷的施加，施加载荷后的结果如图 14.18 所示。

step 3 选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。



1 AREAS
AREA NUM

ANSYS
spanner



The stress analysis of spanner

图 14.16 添加位移结束后的结果

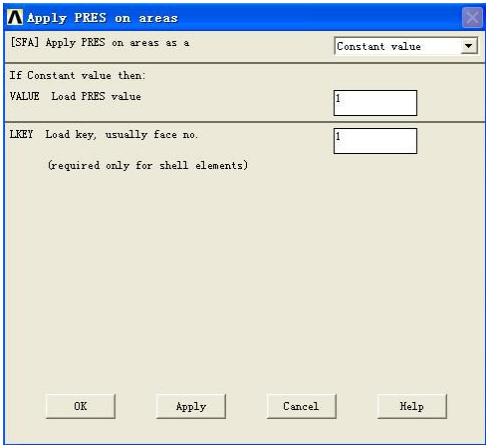
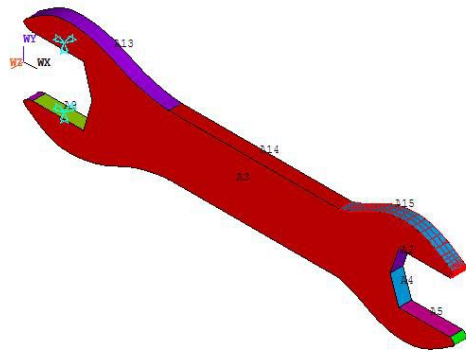


图 14.17 Apply PRES on areas 对话框

1 AREAS
AREA NUM

ANSYS
spanner



The stress analysis of spanner

图 14.18 施加载荷后的结果

step 4 选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 程序开始求解计算。求解结束时，弹出 Note 对话框，单击 Colse 按钮关闭该对话框。

step 5 单击 SAVE_DB 按钮，保存上述操作过程。至此，加载及求解过程结束，下面开始查看和分析结果。

14.1.2.6 查看求解结果

step 1 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def+undeformed 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 14.19 所示。

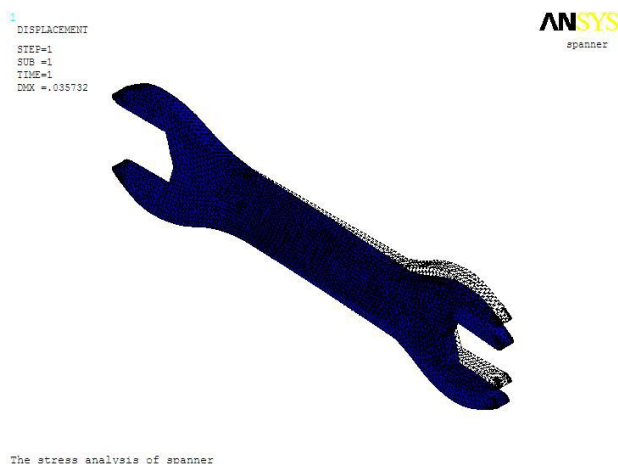


图 14.19 变形后的几何形状和未变形的几何形状

step 2 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，单击 OK 按钮，节点总位移与未变形形状如图 14.20 所示。

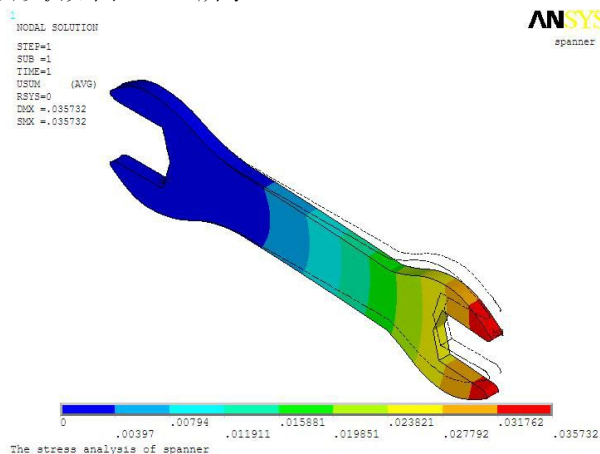


图 14.20 节点总位移与未变形形状显示



step 3 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→Stress→von Mises stress 选项，单击 OK 按钮，得到节点 Mises 等效应力云图，如图 14.21 所示。同样在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→Strain→Total Mechanical Strain→von Mises total mechanical strain 选项，单击 OK 按钮，得到节点 Mises 等效应变云图，如图 14.22 所示。

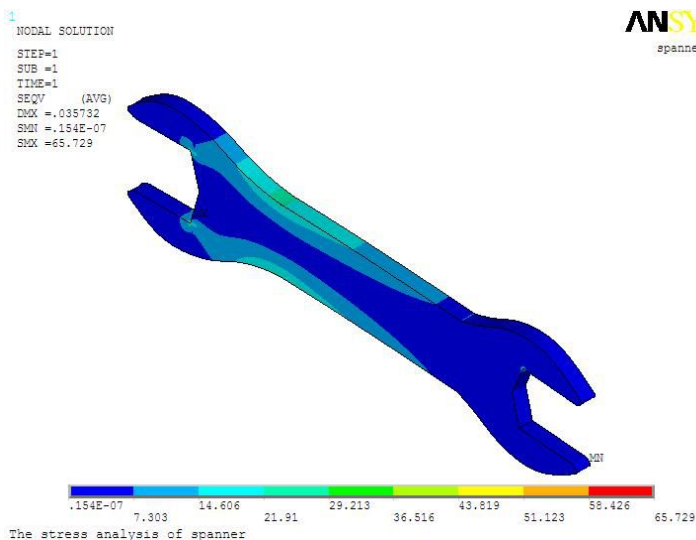


图 14.21 节点 Mises 等效应力云图

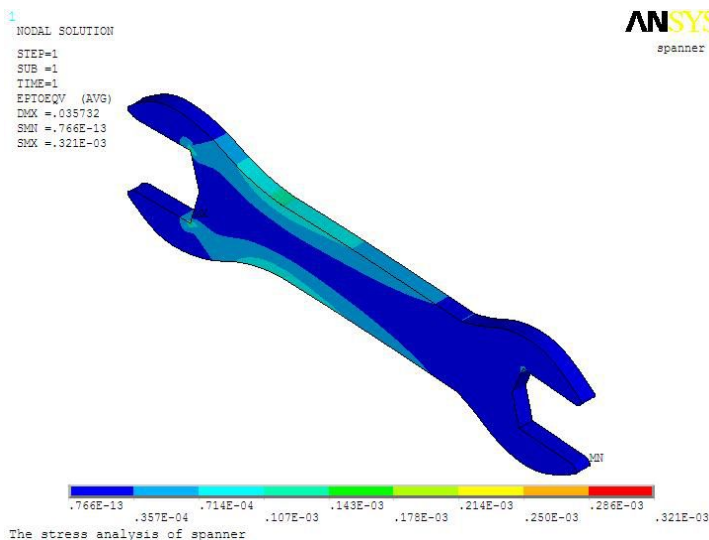


图 14.22 节点 Mises 等效应变云图

step 4 以等值线形式显示节点总位移。选择 Utility Menu→PlotControls→Device Options 命令，弹出 Device Options 对话框，选中 Vector mode (wireframe) 复选框，单击 OK 按钮，生成如图 14.23 所示的等值线形式的节点位移云图。其他云图，如应力云图、应变云图等也可用等值线形式表示。



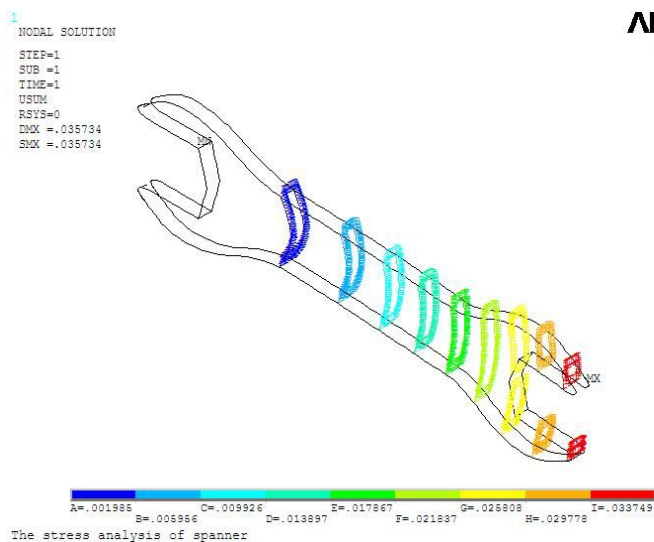


图 14.23 等值线形式的节点位移云图

14.1.2.7 退出系统

step 1 选择 **Utility Menu**→**File**→**Exit** 命令, 弹出 **Exit from ANSYS** 对话框, 选择 **Save Everything** 选项, 单击 **OK** 按钮, 关闭 **ANSYS** 程序。

14.1.3 命令流

命令流如下。

```
/BATCH
/input,menust,tmp,'',,,,,,,,,,,,,,1
WPSTYLE,,,,,,,,0
/FILNAME,spanner,0
/TITLE,The stress analysis of spanner
WPSTYLE,,,,,,,,1
/PREP7
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2e8
MPDATA,PRXY,1,,0.3
ET,1,SOLID95
K,1,16,0,0,
K,2,14,7,0,
K,3,2,7,0,
K,4,0,8,0,
K,5,2,10,0,
K,6,8,13,0,
K,7,18,12,0,
K,8,25,9,0,
K,9,34,7,0,
K,10,74,7,0,
K,11,79,9,0,
```

```
K,12,83,11,0,
K,13,92,12,0,
K,14,100,8,0,
K,15,101,7,0,
K,16,100,6,0,
K,17,88,6,0,
K,18,86,0,0,
K,18,86,0,0,
LSTR,1,2
LSTR,2,3
FLST,3,7,3
FITEM,3,3
FITEM,3,4
FITEM,3,5
FITEM,3,6
FITEM,3,7
FITEM,3,8
FITEM,3,9
BSPLIN, ,P51X
LSTR,9,10
FLST,3,7,3
FITEM,3,10
FITEM,3,11
FITEM,3,12
FITEM,3,13
FITEM,3,14
FITEM,3,15
FITEM,3,16
BSPLIN, ,P51X
LSTR,16,17
LSTR,17,18
LSTR,18,1
FLST,2,8,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,8
AL,P51X
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,1
ARSYM,Y,P51X, , ,0,0
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
AADD,P51X
VOFFST,3,3, ,
SMRT,6
```

```

SMRT,2
ESIZE,1,0,
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
/PREP7
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,1
MPDE,PRXY,1
MPDATA,EX,1,,2.06e5
MPDATA,PRXY,1,,0.3
/PREP7
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,1
MPDE,PRXY,1
MPDATA,EX,1,,2.06E+005
MPDATA,PRXY,1,,0.3
FINISH
/SOL
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,9
FITEM,2,12
/GO
DA,P51X,ALL,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,15
/GO
SFA,P51X,1,PRES,0.5
SOLVE
FINISH
/POST1
FINISH

```

14.2 有限元分析实例详解 2：壳体零件的静力分析

本节应用 **ANSYS Workbench** 仿真平台对壳体零件进行静力分析，首先运用 **SolidWorks** 建模软件建立零件模型，然后将模型导入 **ANSYS Workbench** 中进行静力分析，无须考虑转化格式后的失真问题。

14.2.1 问题描述与分析

壳体零件工程图如图 14.24 所示, 装配时螺钉透过壳体表面四个沉头孔将壳体与其他零件相连, 壳体内台阶平面及内壁的上半部均为配合平面。工作时零件外表面承受 1MPa 压力。零件材料为结构钢。

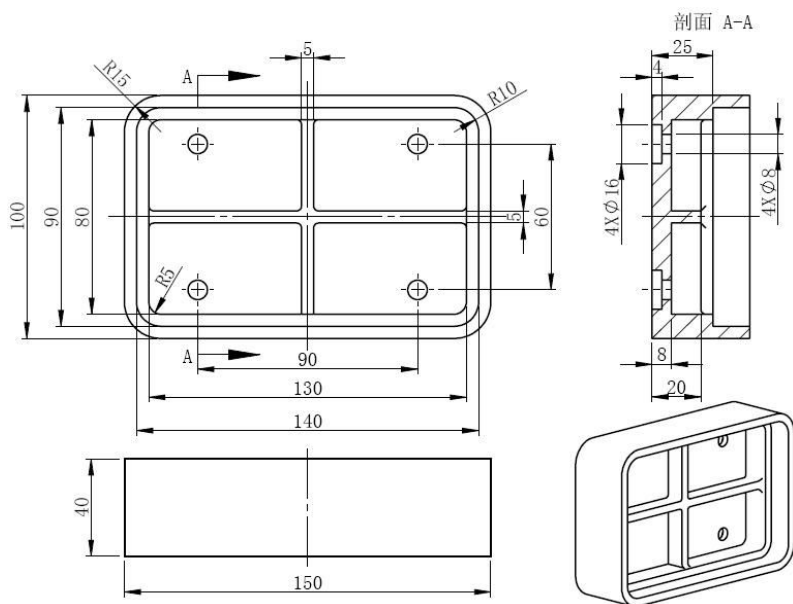


图 14.24 壳体零件工程图

14.2.2 求解过程

14.2.2.1 将 SolidWorks 零件模型导入 ANSYS Workbench 中

step 1 单击 SolidWorks 软件界面上方工具栏中的 ANSYS 12.0 按钮, 如图 14.25 所示, 然后在弹出的下拉菜单中选择 Workbench 命令, 即可进入 ANSYS Workbench 的初始化界面, 如图 14.26 所示。



图 14.25 SolidWorks 模型的导入



安装 ANSYS 12.0 之前请先安装 SolidWorks、Pro/E、UG 等三维建模软件, 然后安装 ANSYS 12.0, 这就使得 ANSYS 12.0 可以自动作为建模软件的一个插件出现在建模界面的工具栏中。

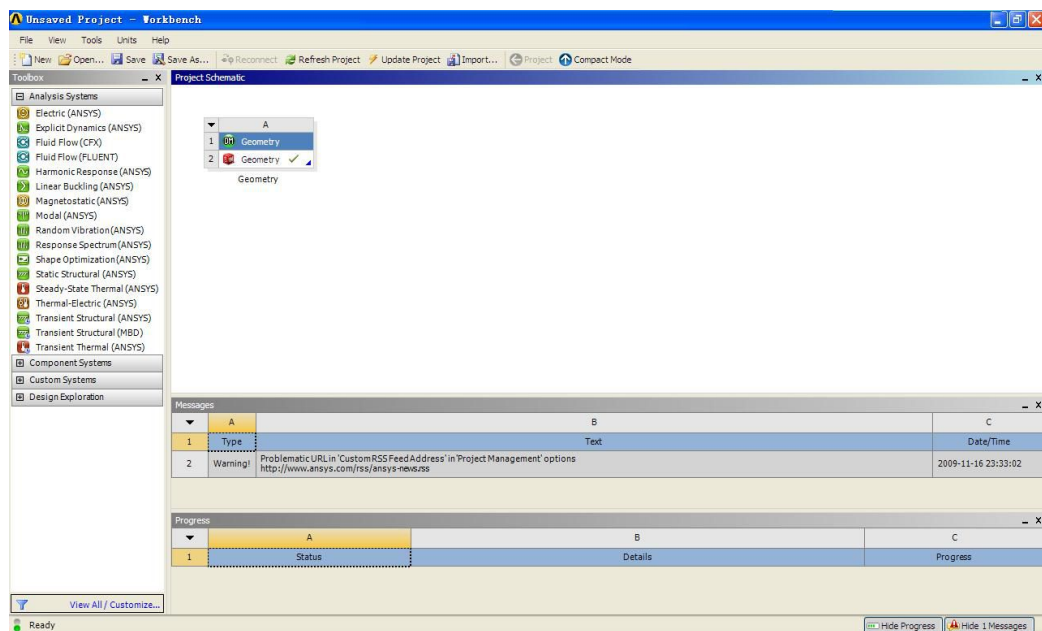


图 14.26 ANSYS Workbench 的初始化界面

14.2.2.2 选择求解的类型

step 1 双击图 14.26 所示界面左侧的 **Analysis Systems** 栏中的 **Static Structural (ANSYS)** 选项（或将其拖动至界面右侧空白处），然后拖动列表框 **A** 中的 **Geometry** 至静力分析列表框 **B** 中 **Geometry** 处以使导入的模型与所选择的计算类型相关联，结果如图 14.27 所示。双击列表框 **B** 中的 **Setup** 按钮即可进入仿真界面。

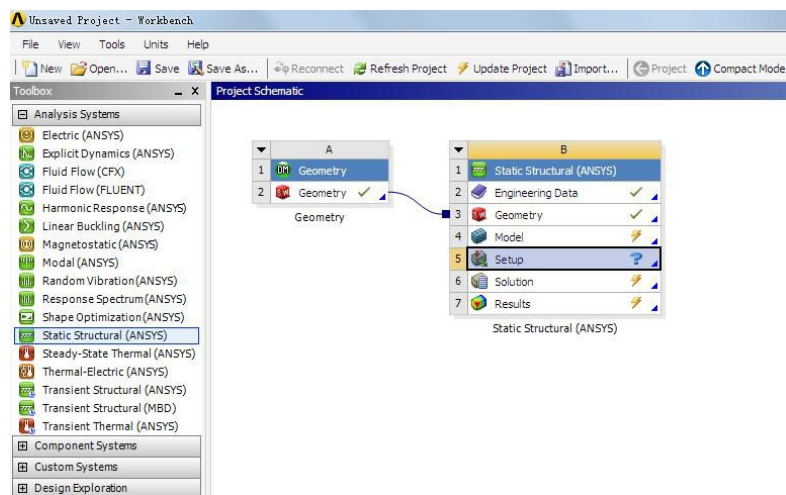


图 14.27 选择静力分析类型

14.2.2.3 壳体零件静力分析

进入仿真界面后，可以在设定完所有的步骤后直接单击静力分析图标，然后单击工具栏中的 **Solve** 按钮进行求解，这时的计算顺序为：材料设定、网格划分、添加约束、施加载荷、运行求解

与查看静力结果。

step 1 单位制选择与材料设定。初次进行有限元分析，单击工具栏中的 Units 按钮，选择单位制为 Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)，如图 14.28 所示。在屏幕左侧的操作树中依次展开 Project→Model (B4) →Geometry→cover 选项，在左边栏 Details of “支架” 中 Material 栏下的 Assignment 选项中，将零件材料设定为 Structural Steel，如图 14.29 所示。

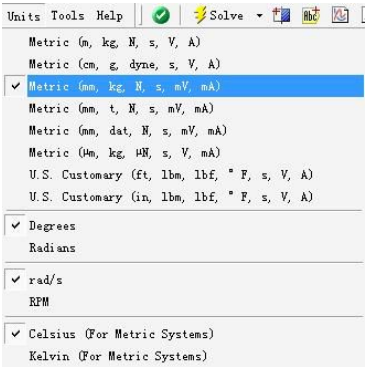


图 14.28 选择单位制

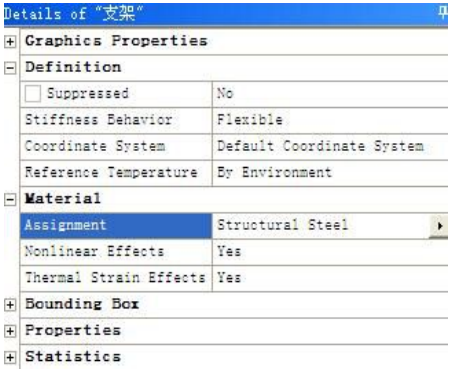


图 14.29 设定零件材料

step 2 网格划分。右击左侧操作树中 Project→Model (B4) 菜单下的 Mesh 选项，在弹出的菜单中选择 Insert 下的 Sizing 选项，然后单击工具栏图形选择工具条中的 body 选择方式，选取整个实体，在左边栏 Details of “Sizing” Sizing→Scope→Geometry 菜单下单击 Apply 按钮，并将 Details of “Sizing” Sizing→Definition→Element Size→Default 值改为 3，完成网格大小的设置；右击 Project→Model (B4) 菜单下的 Mesh 选项，在弹出的菜单中选择 Insert 下的 Method 选项，单击工具栏图形选择工具条中的 body 选择方式，选取整个实体，在左边栏 Details of “Hex Dominant Method” Method→Scope→Geometry 菜单下单击 Apply 按钮，并在 Details of “Hex Dominant Method” Method→Definition →Method 菜单下选择 Hex Dominant 选项，完成网格类型的设置。右击 Model (B4) 下的 Mesh 选项，在弹出的菜单中单击工具栏中的 Solve 选项进行网格划分，网格划分结果如图 14.30 所示。

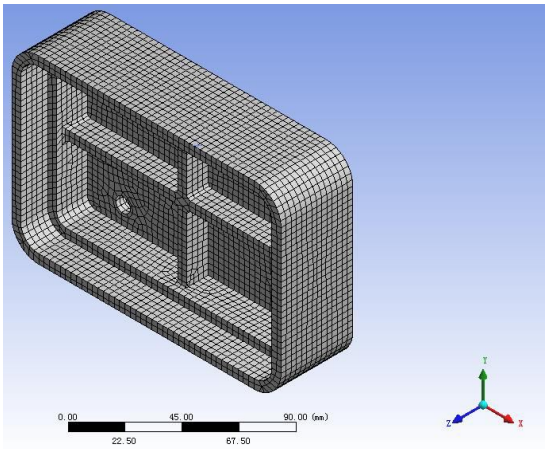


图 14.30 网格划分结果

step 3

添加约束。分别对沉头孔及壳体零件配合面添加约束，首先对沉头孔添加无摩擦约束。单击 **Project→Model (B4)** 菜单中的 **Static Structural (B5)** 选项，单击工具栏中的 **Supports** 选项，在其下拉菜单中选择 **Frictionless Support** (无摩擦约束) 选项，单击工具栏图形选择工具条中的 **face** 选择方式，按住 **Ctrl** 键依次选中壳体表面的 4 个沉头孔平面 (如图 14.31 所示)，单击 **Details of “Frictionless Support”→Scope** 菜单下的 **Apply** 按钮，完成对沉头孔平面的约束；其次对壳体内部台阶面添加无摩擦约束，单击 **Supports** 选项，在其下拉菜单中选择 **Frictionless Support** 选项，选中台阶平面 (如图 14.32 所示)，单击 **Details of “Frictionless Support2”→Scope** 菜单下的 **Apply** 按钮，完成对台阶平面的约束；最后对壳体内壁配合平面添加无摩擦约束，单击工具栏中的 **Supports** 选项，在其下拉菜单中选择 **Frictionless Support** 选项，单击工具栏图形选择工具条中的 **face** 选择方式，先选中内壁上的任一小平面，然后单击屏幕上方工具栏中的 **Extend Selection** 按钮，选择 **Extend to Adjacent** 选项，直到将内壁上所有与初选的小平面相接的平面全部选中，单击 **Details of “Frictionless Support3”→Scope** 菜单下的 **Apply** 按钮，完成对壳体内壁的约束，如图 14.33 和图 14.34 所示。

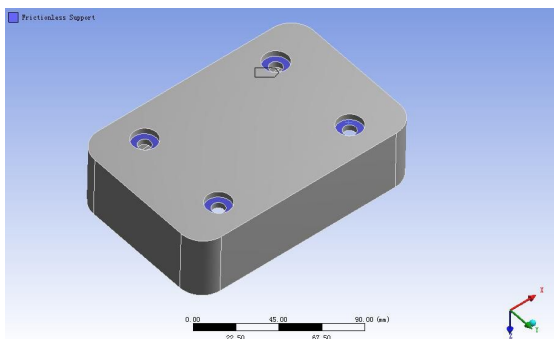


图 14.31 沉头孔无摩擦约束添加结果

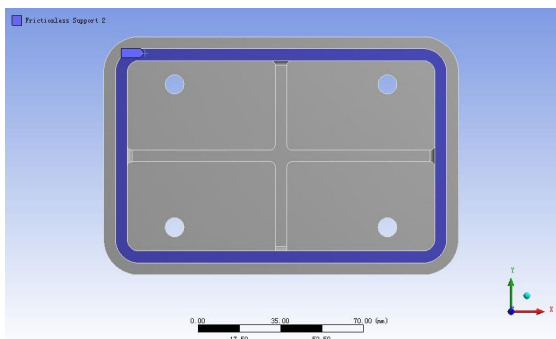


图 14.32 台阶面无摩擦约束添加结果

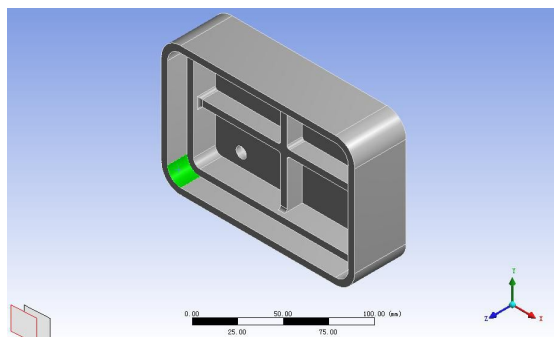


图 14.33 内壁添加无摩擦约束任选平面

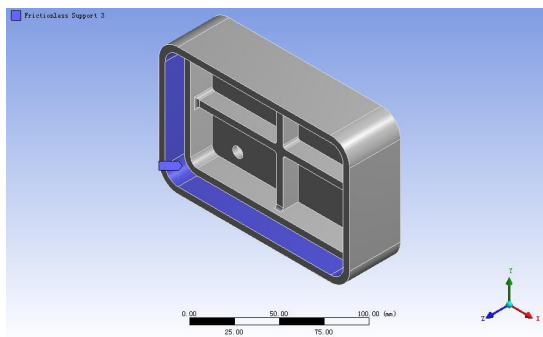


图 14.34 内壁无摩擦约束添加结果

step 4

施加载荷。单击 **Project→Model (B4)** 菜单中的 **Static Structural (B5)** 选项，单击工具栏中的 **Loads** 选项，选择下拉菜单中的 **Pressure** 选项，按住 **Ctrl** 键依次将壳体的外表面全部选中，单击 **Details of “Pressure”→Scope→Geometry** 菜单下的 **Apply** 按钮；在 **Details of “Pressure”→Scope→Definition** 菜单下的 **Magnitude** 栏中填入 **1MP**，完成载荷的添加，加载结果如图 14.35 所示。

step 5

设定所需的求解结果。单击 **Project→Model (B4)** 菜单中 **Static Structural (B5)** 栏下

的 **Solution (B6)** 选项, 单击工具栏中的 **Stress** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Equivalent (von-Mises)** 选项; 单击工具栏中的 **Strain** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Equivalent (von-Mises)** 选项; 单击工具栏中的 **Deformation** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Total** 选项; 单击工具栏中的 **Deformation** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Directional** 选项, 重复操作 3 次, 并将 **Details of “Directional Deformation”** → **Definition** 菜单下的 **Orientation** 选项依次设定为 **X Axis**, **Y Axis** 和 **Z Axis**, 设定的求解参数如图 14.36 所示。

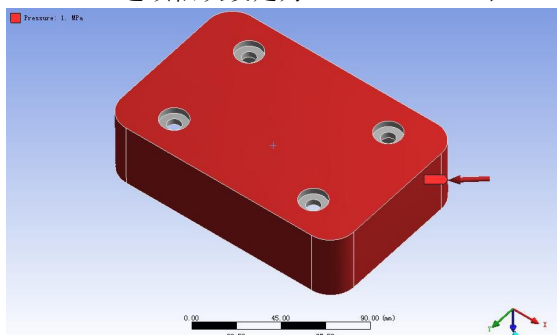


图 14.35 加载结果

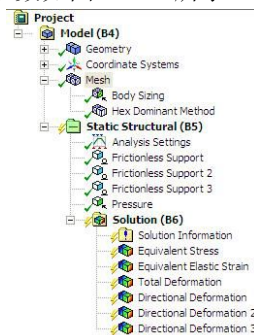


图 14.36 静力分析参数设定结果

step 6

进行求解及结果查看。单击 **Project** → **Model B4** 菜单中 **Static Structural B5** 栏下的 **Solution** 选项, 单击工具栏中的 **Solve** 按钮开始进行求解。依次单击 **Project** → **Model (B4)** → **Static Structural (B5)** → **Solution (B6)** → **Equivalent Stress**、**Equivalent Elastic Strain**、**Total Deformation** 等选项, 可对求解的结果进行分析, 求解得到的应力云图、应变云图分别如图 14.37、图 14.38 所示。总变形图及 X、Y、Z 三个方向的变形图如图 14.39~图 14.42 所示。由变形图可知, **Z** 方向是零件变形的方向, 这是由于零件中间部位强度较弱所致。

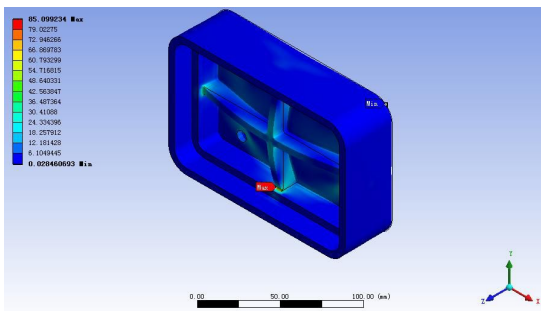


图 14.37 静力分析应力云图

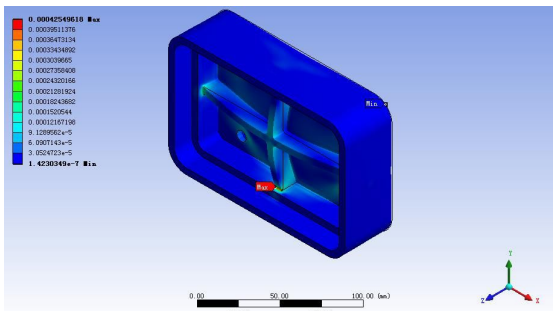


图 14.38 静力分析应变云图

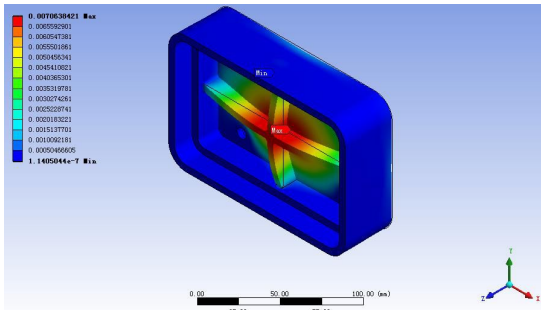


图 14.39 总变形图

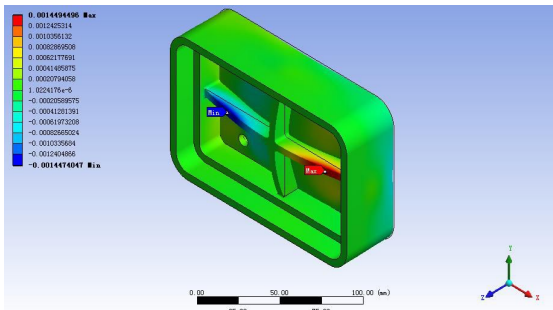


图 14.40 X向变形图

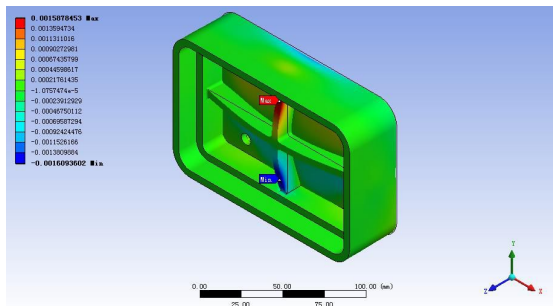


图 14.41 Y 向变形图

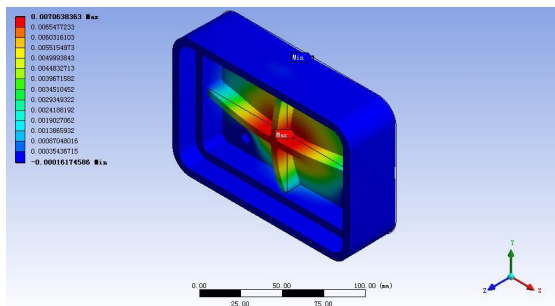


图 14.42 Z 向变形图

step 7

求解结果查看。求解得到的变形图除用云图的形式表示外，还可表示为等高线以及矢量形式。要使变形图以等高线形式表示，可选择 **Total Deformation** 选项，在屏幕上方的工具栏中将 **Contours** 选项设置为 **Isolines**，结果如图 14.43 所示；选择 **Total Deformation** 选项，在工具栏中单击 **Graphics** 按钮，变形结果则表现为矢量形式，调整工具栏中 **Vector Display** 一栏中的按钮，可使图形显示更加直观，结果如图 14.44 所示。其余求解的结果云图也可用这种等高线及矢量的方式进行表示。

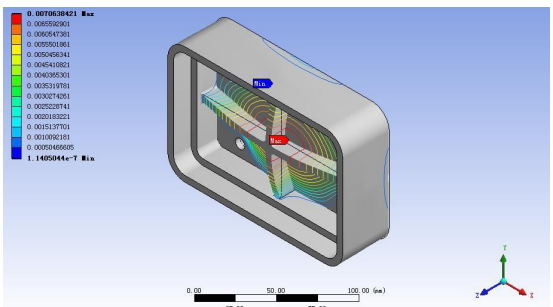


图 14.43 等高线形式变形图

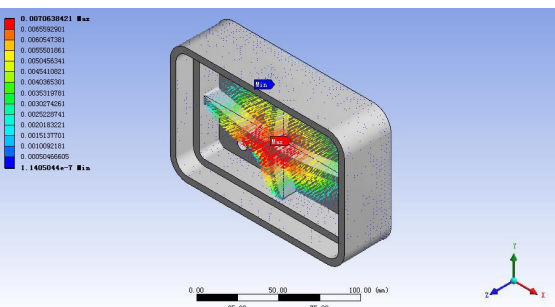


图 14.44 矢量形式变形图

14.3 有限元分析实例详解 3：支架零件模态分析

本节应用 **ANSYS Workbench** 仿真平台对支架零件进行模态分析，首先通过 **SolidWorks** 建模软件建立零件模型，然后将模型导入 **ANSYS Workbench** 中进行静力分析，然后在静力分析基础上进行有预应力的模态分析。

14.3.1 问题描述与分析

如图 14.45 所示的支架零件，装配时螺钉透过左右两侧的 6 个沉头孔将支架与运动部件相连，支架前端面与被支撑件相连，由此运动部件通过支架带动被支撑件在竖直方向上运动。被支撑件对支架的作用可以看做远程载荷， $F=15N$ ，方向竖直向下；支架零件材料为结构钢。

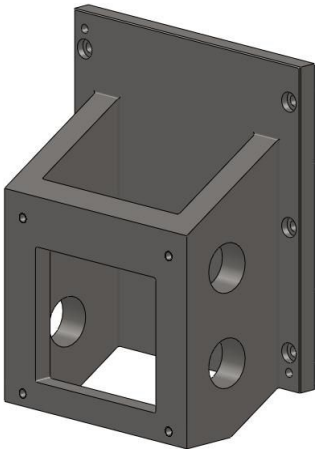


图 14.45 支架零件轴测图

14.3.2 求解过程

14.3.2.1 将 SolidWorks 零件模型导入 ANSYS Workbench 初始化界面

step 1 单击 SolidWorks 软件界面上方工具栏中的 **Ansys12.0** 按钮，然后单击 **Workbench** 图标，即可进入 ANSYS Workbench 初始化界面。

14.3.2.2 选择求解的类型

step 1 求解类型的设定。根据 14.2.2.2 节中的操作步骤，添加静力分析类型，并将由 SolidWorks 导入的几何模型与静力分析对话框中的 **Geometry** 相关联。右击静力分析对话框 B 中的 **Solution** 按钮，在弹出的菜单中的 **Transfer Data To New** 栏下选择 **Modal (ANSYS)** 选项，将支架静力分析的结果设定为模态分析时的初始条件，于是可实现预应力状态下的模态分析，此过程也可通过双击初始化界面中 **Toolbox** 下 **Custom Systems** 栏中的 **Pre-Stress Modal** 选项来实现。设定分析类型后的结果如图 14.46 所示。双击对话框 C 中的 **Setup** 按钮即可进入仿真界面。

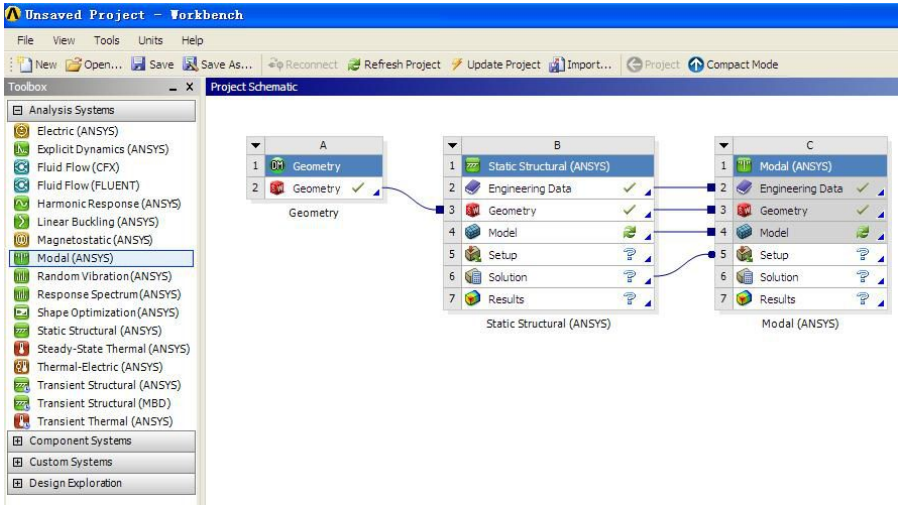


图 14.46 预应力模态分析类型设定结果



14.3.2.3 静态有限元分析

进入仿真界面后,可以在设定完所有的步骤后直接选择模态分析类型,然后单击工具栏中的 **Solve** 按钮进行求解,这时计算的顺序为:网格划分、进行静力分析求解、进行模态分析求解。本例中为了详述分析的步骤,按照先设定参数并进行静力分析,而后再进行模态分析的计算顺序进行讲解。

step 1 材料设定。双击图 14.46 中对话框 C 中的 **Setup** 按钮,进入模态分析界面。右击操作树中的 **Project** 选项,在弹出的菜单中选择 **Rename** 选项,将 **Project** 名字改为“支架”;在左侧操作树中,单击支架→**Model (B4, C4)**→**Geometry** 菜单下的支架选项,在左边栏 **Details of “支架”**→**Material** 菜单下的 **Assignment** 栏中将零件材料设定为 **Structural Steel**,如图 14.47 所示。

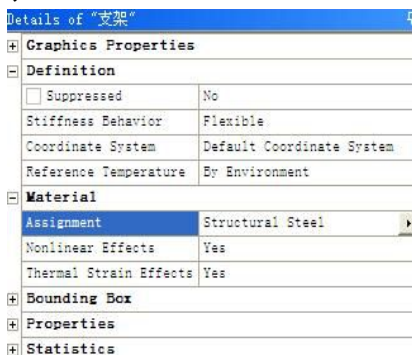


图 14.47 零件材料设定结果

step 2 添加局部坐标系。为方便加载,现建立局部坐标系。右击支架→**Model (B4, C4)**→**Coordinate Systems** 命令,在弹出的菜单的 **Insert** 栏中选择 **Coordinate System** 选项。用鼠标左键拾取零件前端面左下角点,并在 **Details of “Coordinate System”**→**Origin** 菜单下单击 **Apply** 按钮,完成局部坐标系的建立,建立的局部坐标系如图 14.48 所示。

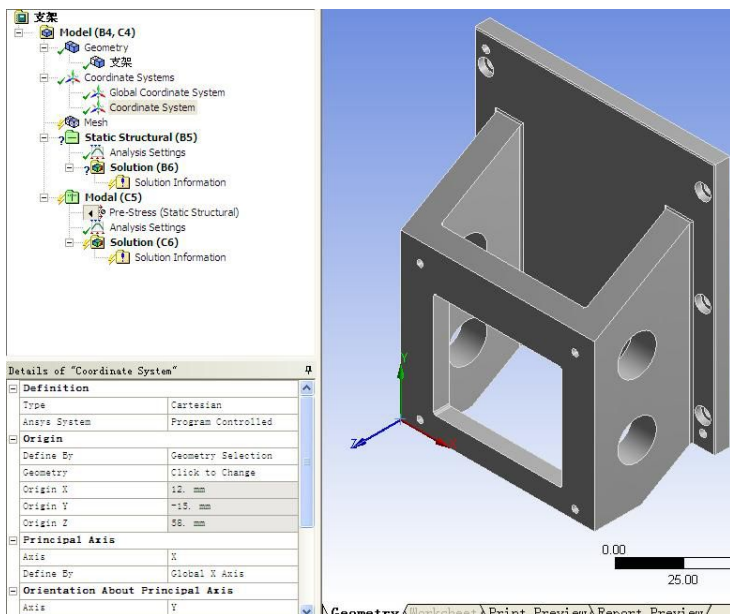


图 14.48 局部坐标系建立结果

**step 3**

网格划分。右击支架→Model (B4, C4)→Mesh 选项, 在弹出菜单的 Insert 栏下选择 Sizing 选项, 然后单击工具栏图形选择工具条中的 body 选择方式, 选取整个实体, 在左边栏 Details of “Sizing” Sizing→Scope→Geometry 菜单下单击 Apply 按钮, 并将 Details of “Sizing” Sizing→Definition→Element Size→Default 值改为 3, 完成网格大小的设置; 右击 Mesh 选项, 右击支架→Model (B4, C4)→Mesh 选项, 在弹出菜单的 Insert 栏下选择 Method 选项, 单击工具栏图形选择工具条中的 body 选择方式, 选取整个实体, 在 Details of “Hex Dominant Method” Method→Scope→Geometry 菜单下单击 Apply 按钮, 完成实体的选取, 并将 Details of “Hex Dominant Method” Method→Definition 菜单下的 Method 选项设定为 Hex Dominant; 单击支架→Model (B4, C4)→Mesh 选项, 单击工具栏中的 Solve 按钮进行网格划分。

step 4

添加约束。单击支架→Model (B4, C4)→Static Structural (B5) 选项, 单击工具栏中的 Supports 选项, 在其下拉菜单中选择 Frictionless Support 选项, 按住 Ctrl 键依次选中螺钉连接处的 6 个沉头孔内平面 (局部视图如图 14.49 所示) 及支架背面, 单击 Details of “Frictionless Support”→Scope 菜单下的 Apply 按钮, 完成无摩擦约束的添加; 单击工具栏中的 Supports 选项, 在其下拉菜单中选择 Cylindrical Support (圆柱约束) 选项, 依次选中 6 个沉头孔圆柱面 (局部视图如图 14.50 所示), 单击 Details of “Cylindrical Support”→Scope 菜单下的 Apply 按钮, 完成圆柱约束的添加。

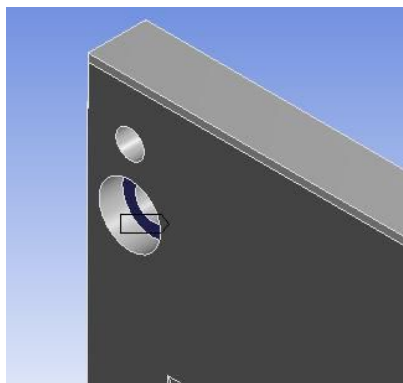


图 14.49 无摩擦约束添加结果

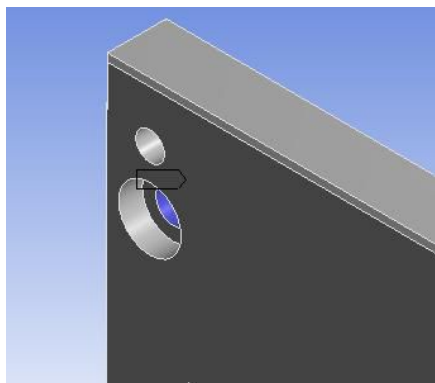


图 14.50 圆柱约束添加结果

step 5

施加载荷。单击支架→Model (B4, C4)→Static Structural (B5) 选项, 单击工具栏中的 Loads 选项, 在其下拉菜单中选择 Remote Force 选项, 选取支架前端面, 单击 Details of “Remote Force”→Geometry 菜单下的 Apply 按钮, 完成载荷面的选取; 将 Details of “Remote Force”→Coordinate System 选项设定为 Coordinate System, 依次在 X, Y, Z 三个分量中填入 50mm, 30mm, 40mm; 将 Details of “Remote Force”→Define By 选项设定为 Components, 依次在 X, Y, Z 三个分量中填入 0, -15N, 0, 远程载荷设置细节如图 14.51 所示。添加远程载荷后的结果如图 14.52 所示。

step 6

设定所需的求解结果。单击支架→Model (B4, C4)→Static Structural (B5)→Solution (B6) 选项, 单击工具栏中的 Stress 选项, 在其下拉菜单中选择 Equivalent (von-Mises) 选项; 单击工具栏中的 Strain 选项, 在其下拉菜单中选择 Equivalent (von-Mises) 选项; 单击工具栏中的 Deformation 选项, 在其下拉菜单中选择 Total 选项; 单击工具栏下面的 Deformation 选项, 在其下拉菜单中选择 Directional 选项, 重复操作 3 次, 并将 Details



of “Directional Deformation”→Definition 菜单下的 Orientation 选项依次设定为 X Axis, Y Axis, Z Axis。至此，静力分析设定完毕，结果如图 14.53 所示。

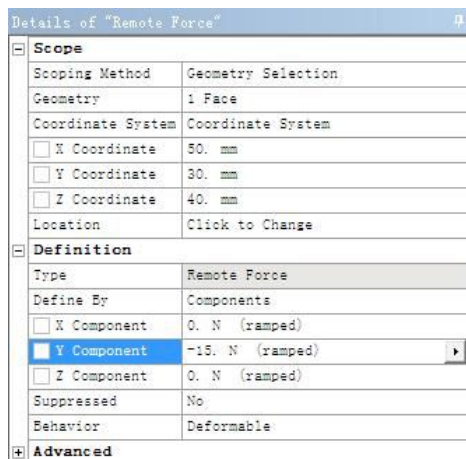


图 14.51 远程载荷设置细节

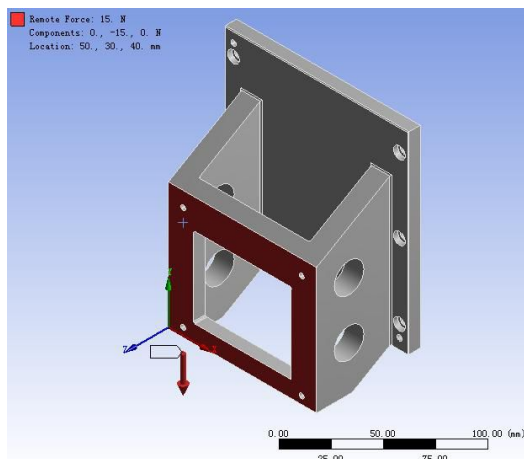


图 14.52 远程载荷施加结果

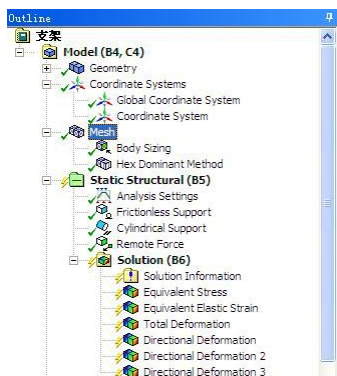


图 14.53 静力分析参数设定结果

step 7

进行求解及结果查看。单击支架→Model (B4, C4)→Static Structural (B5)→Solution 选项，单击工具栏中的 Solve 按钮，开始进行求解。依次单击支架→Model (B4, C4)→Static Structural (B5)→Solution (B6)→Equivalent Stress、Equivalent Elastic Strain、Total Deformation 等选项，对求解的结果进行分析，求解得到的应力云图、应变云图、总变形图以及 X 方向变形图分别如图 14.54-图 14.57 所示。

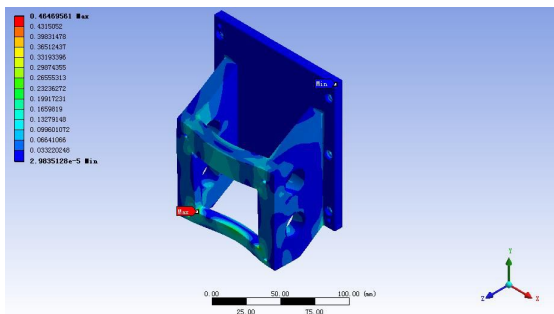


图 14.54 静力分析应力云图

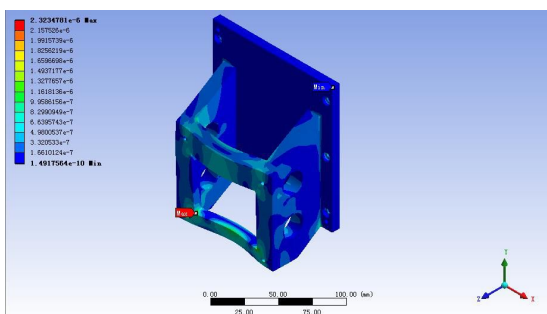


图 14.55 静力分析应变云图

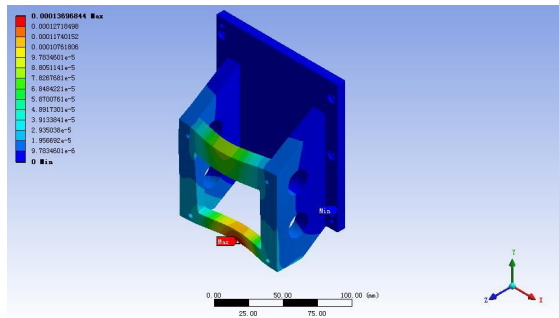


图 14.56 静力分析总变形图

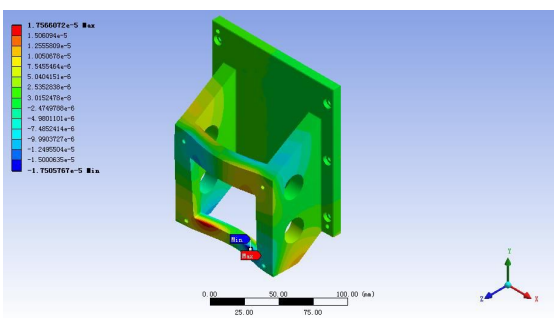


图 14.57 静力分析 X 方向变形图

14.3.2.4 支架模态分析

step 1 设定求解的初始条件。由于在计算之初选择分析类型时，将静力分析的 **Solution** 与模态分析的 **Setup** 相关联，因此此时模态分析的初始状态即为静力分析的结果，如图 14.58 所示。依次展开支架→**Model (B4, C4)**→**Modal (C5)**→**Analysis Settings** 选项，将 **Details of “Analysis Settings”**→**Options**→**Max Modes to Find** 选项设置为 6 阶，结果如图 14.59 所示（此处可根据实际情况设置求解的阶次）。

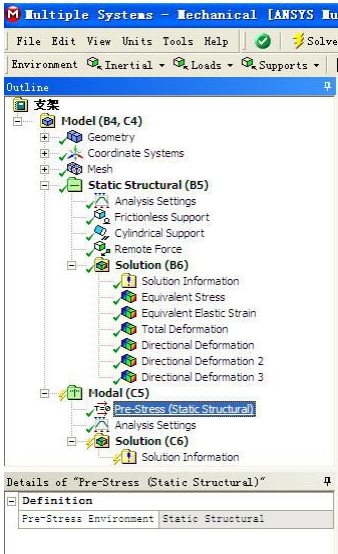


图 14.58 模态分析初始状态

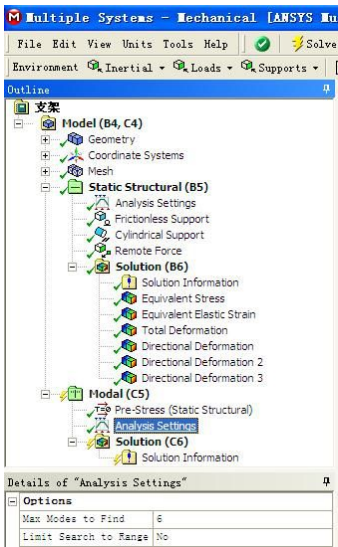


图 14.59 模态分析阶次设定

step 2 设定所需的求解结果。依次展开支架→**Model (B4, C4)**→**Modal (C5)**→**Solution (C6)** 选项，单击工具栏中的 **Deformation** 选项，在其下拉菜单中选择 **Total** 选项，连续执行 6 次，并分别将 **Details of “Total Deformation”**→**Definition**→**Mode** 选项设置为 1、2、3、4、5、6 阶。单击工具栏中的 **Solve** 按钮进行求解。

step 3 依次展开支架→**Model (B4, C4)**→**Modal (C5)**→**Solution (C6)** 选项，单击工具栏中的 **Solve** 按钮开始求解。求解得到前六阶模态值如图 14.60 所示，前六阶模态振型云图分别如图 14.61~图 14.66 所示。

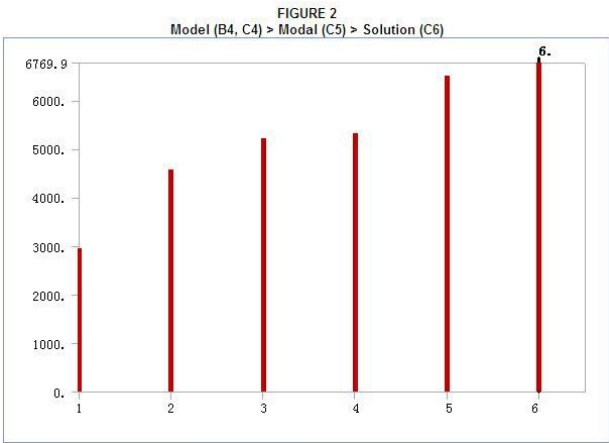


图 14.60 前六阶模态值

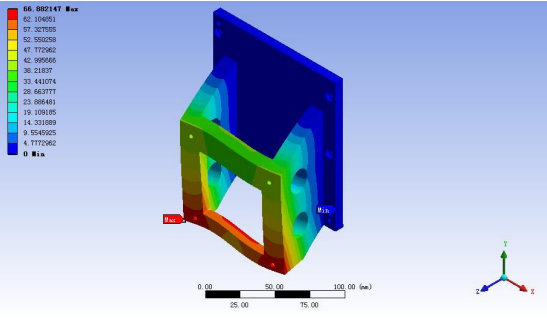


图 14.61 一阶模态振型云图

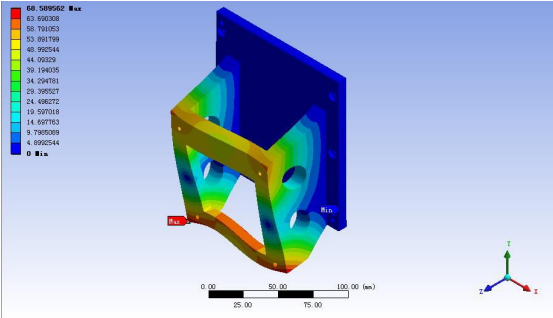


图 14.62 二阶模态振型云图

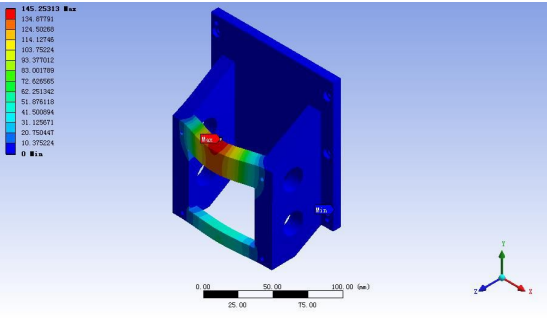


图 14.63 三阶模态振型云图

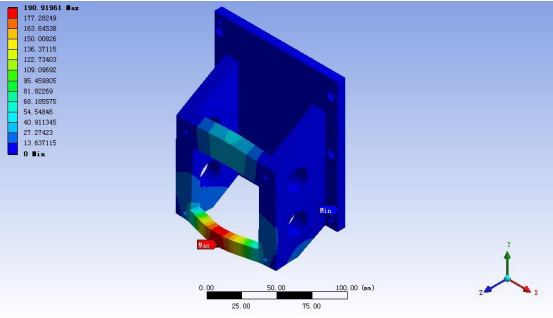


图 14.64 四阶模态振型云图

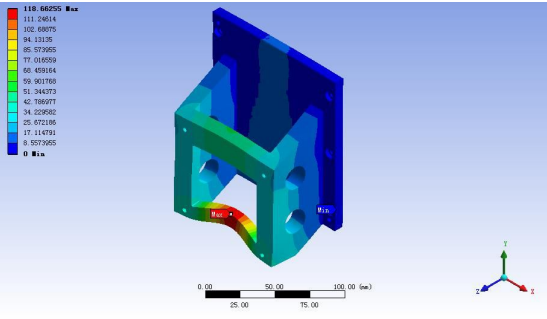


图 14.65 五阶模态振型云图

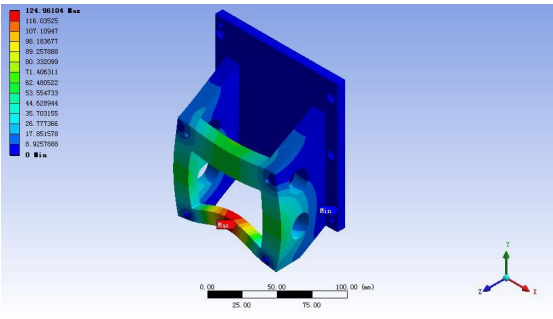


图 14.66 六阶模态振型云图

14.4 有限元分析实例详解 4: 电机支架的拓扑结构优化设计

基于 CAE 技术发展起来的拓扑优化设计技术被用于新产品的开发过程中,或是在没有成功经验借鉴的情况下,快捷、准确地确定产品的初始构型。与传统优化设计的不同之处在于,拓扑优化设计不需要优化设计变量,它将整个结构上的质量分布函数作为优化参数(自动将 CAE 模型中每个单元的“伪密度”作为设计变量),其优化目标是在满足所给定的约束条件下,使所选择的优化指标最小化或最大化(如结构柔度能量达到最小化,结构基频达到最大化等)。

本节应用 ANSYS Workbench 仿真平台对电机支架进行结构优化设计,首先运用 SolidWorks 建模软件建立零件模型,然后直接将模型导入 ANSYS Workbench 中进行优化,而后根据优化的结果在 SolidWorks 中进行模型修改,最后再对电机支架进行静力分析,以验证优化后零件的强度、刚度是否满足使用要求。

14.4.1 问题描述与分析

电机支架工程图如图 14.67 所示,装配时螺钉透过左右两侧的 4 个沉头孔将其与其他部件相连,通过支架竖直面上的 4 个 M4 螺钉孔将电机与电机支架相连。电机对支架的作用可以看做远程载荷, $F=5N$,方向竖直向下;支架零件材料为结构钢。

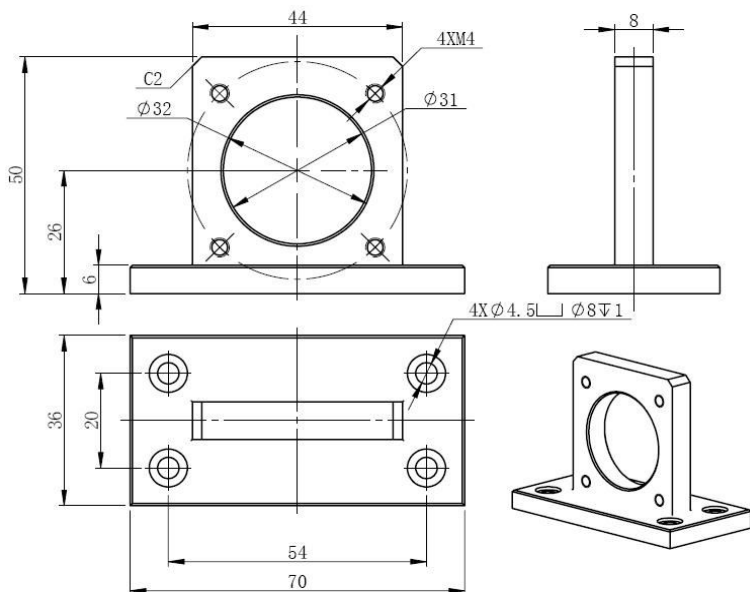


图 14.67 电机支架工程图

14.4.2 电机支架拓扑结构优化设计

14.4.2.1 将 SolidWorks 零件模型导入 ANSYS Workbench 初始化界面

step 1 单击 SolidWorks 软件界面上方工具栏中的 Ansys12.0 按钮,然后单击 Workbench 图标,即可进入初始化界面。

14. 4. 2. 2 选择求解的类型

step 1 求解类型的设定。根据 14.2.2.2 节中的操作步骤，在如图 14.68 所示的界面中，将左侧 Analysis Systems 面板中的 Shape Optimization（ANSYS）选项拖动至右侧空白处，然后拖动对话框 A 中的 Geometry 选项至静力分析对话框 B 中的 Geometry 选项处，以使导入的模型与所选择的计算类型相关联，结果如图 14.68 所示。双击对话框 B 中的 Setup 按钮，进入结构优化仿真界面。

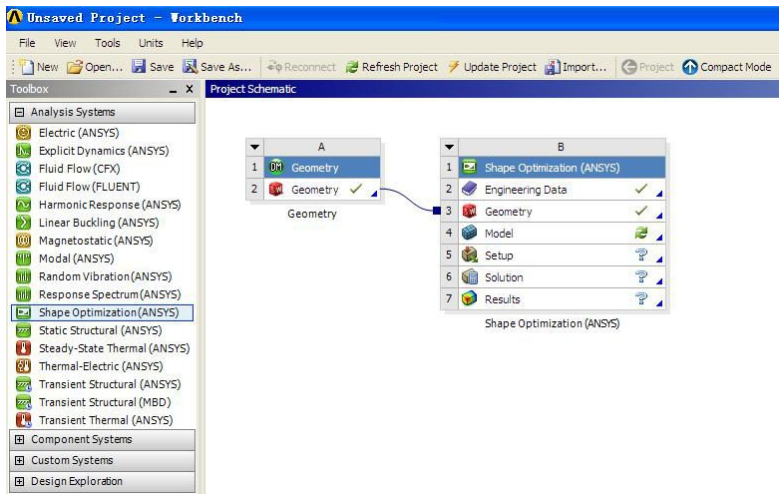


图 14. 68 结构优化分析类型设定结果

14. 4. 2. 3 拓扑结构优化

进入仿真界面后,优化过程按照设定材料属性→网格划分→施加载荷→设定优化参数→进行求解的顺序进行。

step 1 材料设定。在屏幕左侧的操作树中依次展开 Project→Model（B4）→Geometry→cover 选项，在左边栏 Details of “支架”中 Material 栏下的 Assignment 栏中，将零件材料设定为 Structural Steel。设定结果如图 14.69 所示。

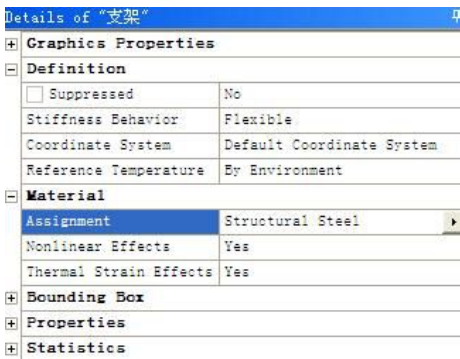


图 14. 69 零件材料设定结果

step 2 局部坐标系的建立。为方便加载，现建立局部坐标系。右击 Project→Model（B4）→Coordinate Systems 选项，在弹出菜单的 Insert 栏中选择 Coordinate System 选项。用

鼠标左键拾取零件底面左下角的点，并单击 Details of “Coordinate System” → Origin 菜单下的 Apply 按钮，完成局部坐标系的建立，并单击 Details of “Coordinate System” → Origin → Apply 选项，建立的局部坐标系如图 14.70 所示。

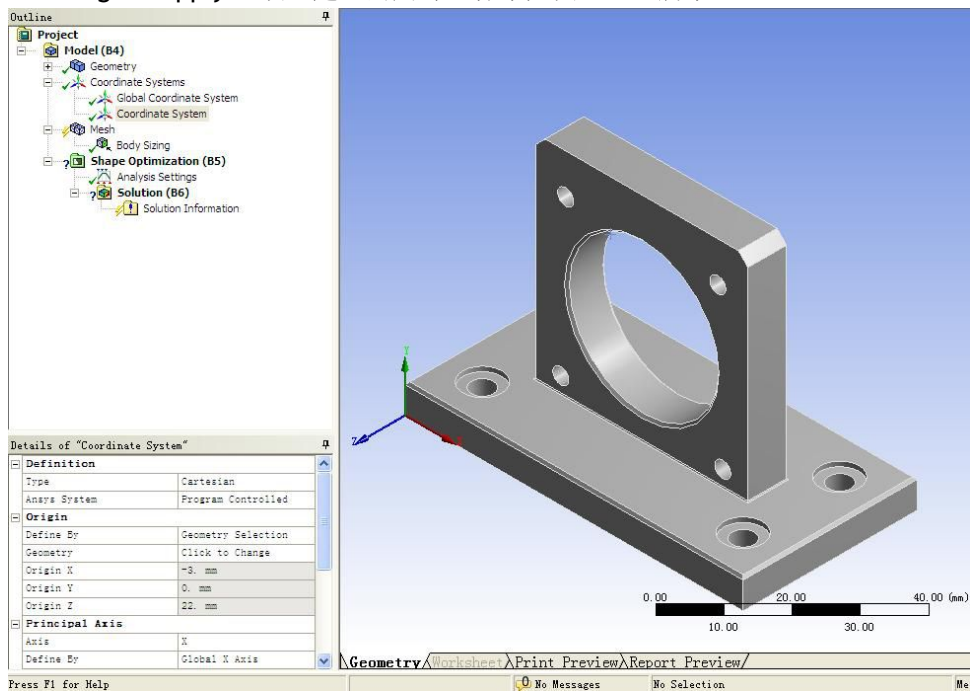


图 14.70 局部坐标系建立结果

step 3 网格划分。右击 Project → Model (B4) → Mesh 选项，在弹出菜单中的 Inserts 栏下选择 Sizing 选项，然后单击工具栏图形选择工具条中的 body 选择方式，选取整个实体，在左边栏 Details of “Sizing” Sizing → Scope → Geometry 菜单下单击 Apply 按钮，并将 Details of “Sizing” Sizing → Definition → Element Size → Default 值改为 1，完成网格大小的设置；右击 Mesh 选项，右击 Project → Model (B4) → Mesh 选项，在弹出菜单中的 Insert 栏下选择 Method 选项，单击工具栏图形选择工具条中的 body 选择方式，选取整个实体，单击 Details of “Hex Dominant Method” Method → Scope → Geometry 菜单下的 Apply 按钮，完成实体的选取，并将 Details of “Hex Dominant Method” Method → Definition 菜单下的 Method 选项设定为 Hex Dominant；单击 Project → Model (B4) → Mesh 选项，单击工具栏中的 Solve 按钮进行网格划分。

step 4 添加约束。首先对沉头孔及零件底面添加无摩擦约束，单击 Project → Model (B4) → Shape Optimization (B5) 选项，单击工具栏中的 Supports 选项，在其下拉菜单中选择 Frictionless Support 选项，按住 Ctrl 键依次选中 4 个沉头孔平面及零件底面，单击 Details of “Frictionless Support” → Scope 菜单下的 Apply 按钮，完成无摩擦约束的添加，结果如图 14.71 所示；其次对沉头孔圆柱面添加圆柱约束，单击工具栏中的 Supports 选项，在其下拉菜单中选择 Cylindrical Support 选项，按住 Ctrl 键依次选中 4 个沉头螺钉孔圆柱面，单击 Details of “Cylindrical Support” → Scope 菜单下的 Apply 按钮，完成圆柱约束的添加，结果如图 14.72 所示。

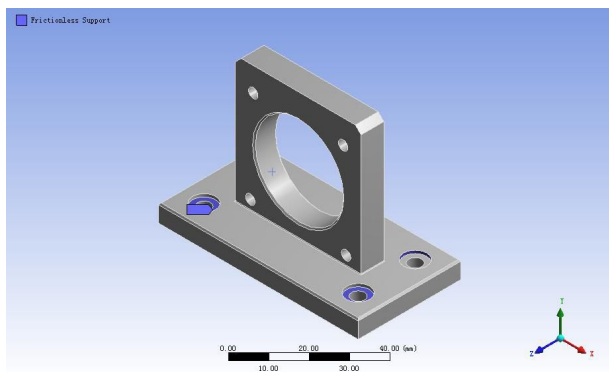


图 14.71 无摩擦约束添加结果

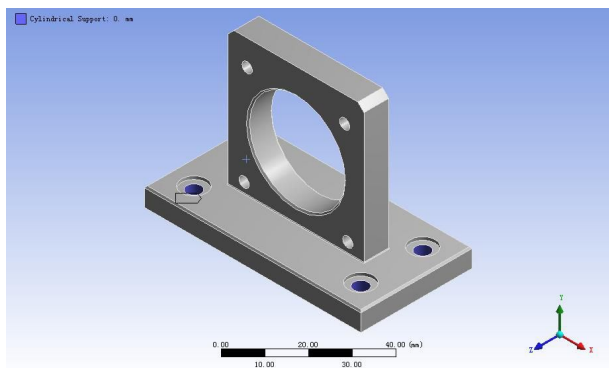


图 14.72 圆柱约束添加结果

step 5

施加载荷。单击 **Project→Model (B4) → Shape Optimization (B5)** 选项, 单击工具栏中的 **Loads** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Remote Force** 选项, 选取支架前端面, 单击 **Details of “Remote Force”→Geometry** 菜单下的 **Apply** 按钮, 完成载荷面的选取; 将 **Details of “Remote Force”→Coordinate System** 选项设定为 **Coordinate System**, 依次在 X, Y, Z 三个分量中填入 35mm, 26mm, 60mm; 将 **Details of “Remote Force”→Define By** 选项设定为 **Components**, 依次在 X, Y, Z 三个分量中填入 0, -5N, 0, 远程载荷设置细节如图 14.73 所示。施加的远程载荷如图 14.74 所示。

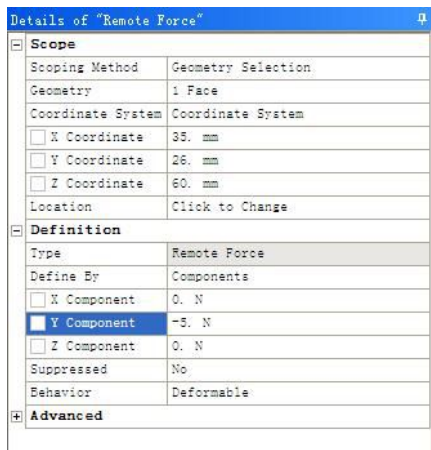


图 14.73 远程载荷设置细节

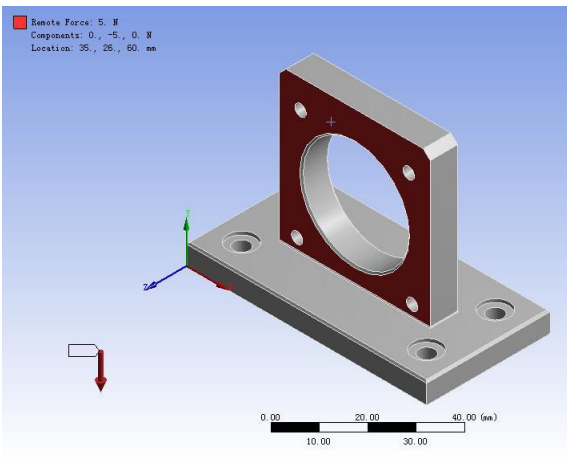


图 14.74 远程载荷施加结果



step 6 设定所需的求解结果。右击 **Project**→**Model (B4)** →**Shape Optimization (B5)** →**Solution (B6)**选项,在弹出的菜单中选择 **Insert** 栏下的 **Shape Finder** 选项;将 **Details of “Shape Finder”** →**Definition** 菜单下的 **Target Reduction** 选项设置为 20%。至此,拓扑结构优化分析设定完毕,其结果如图 14.75 所示。

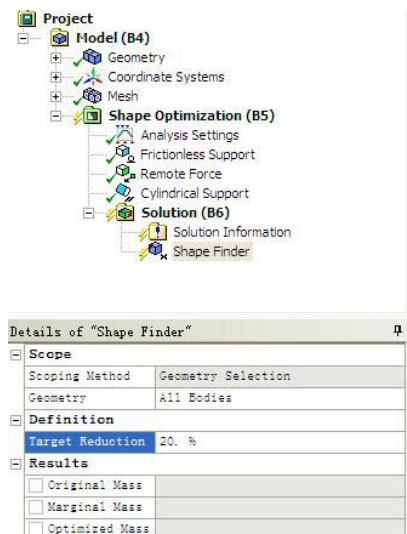


图 14.75 拓扑结构优化分析参数设定结果

step 7 进行求解及结果查看。单击 **Project**→**Model (B4)** →**Shape Optimization (B5)** →**Solution (B6)** 选项,单击工具栏中的 **Solve** 按钮,开始进行求解。求解完成后,单击 **Project**→**Model (B4)** →**Shape Optimization (B5)** →**Solution (B6)** →**Shape Finder** 选项,求解结果如图 14.76 所示。其中,不同的颜色代表了应该去除和保留的部分,灰色代表应该保留的部分,红色代表应该去除的部分。

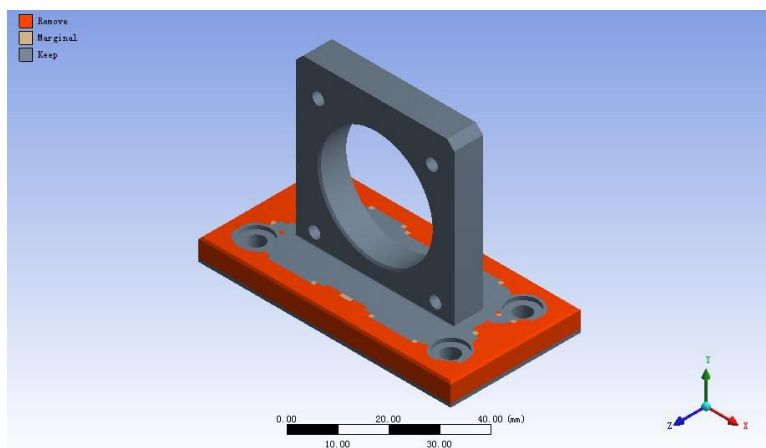


图 14.76 拓扑结构优化分析结果

14.4.3. 优化后电机支架的静力分析

根据 14.4.2 节中进行的拓扑结构优化分析结果,利用 SolidWorks 软件对原有的电机支架模型

14.4.3.3 静态有限元分析

step 1 材料设定。单击 **Project**→**Model (B4)**→**Geometry**→支架选项，在左边栏 **Details of “支架”** 中的 **Material** 栏下单击 **Assignment** 选项，将零件材料设定为 **Structural Steel**，完成零件材料的设置。零件材料设定结果如图 14.79 所示。

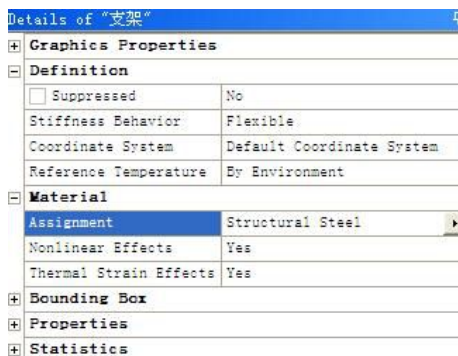


图 14.79 零件材料设定结果

step 2 添加局部坐标系。为方便加载，现建立局部坐标系。右击 **Project**→**Static Structural (B5)**→**Coordinate Systems** 选项，在弹出菜单的 **Insert** 栏中选择 **Coordinate System** 选项，用鼠标左键拾取零件前端面左下角点，并单击 **Details of “Coordinate System”**→**Origin** 菜单下的 **Apply** 按钮，完成局部坐标系的建立，建立的局部坐标系如图 14.80 所示。

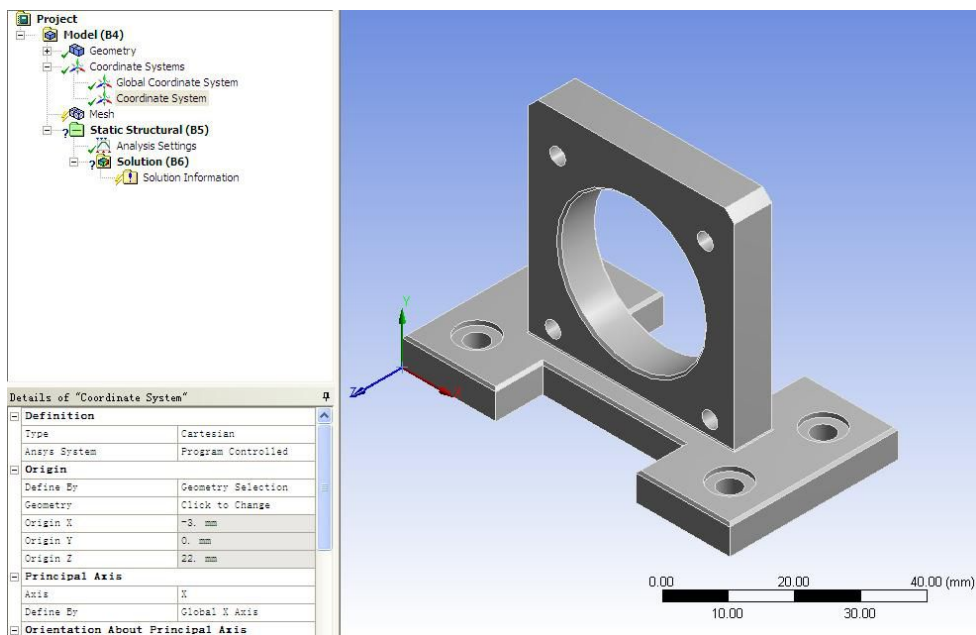


图 14.80 局部坐标系的建立结果

step 3 网格划分。右击 **Project**→**Model (B4)**→**Mesh** 选项，在弹出菜单中的 **Insert** 栏下选择 **Sizing** 选项，然后单击工具栏图形选择工具条中的 **body** 选择方式，选取整个实体，在左边栏 **Details of “Sizing”** **Sizing**→**Scope**→**Geometry** 菜单下单击 **Apply** 按钮，并将 **Details of “Sizing”** **Sizing**→**Definition**→**Element Size**→**Default** 值改为 1，完成网格

大小的设置；右击 **Mesh** 选项，右击 **Project→Model (B4)→Mesh** 选项，在弹出菜单的 **Insert** 栏下选择 **Method** 选项，单击工具栏图形选择工具条中的 **body** 选择方式，选取整个实体，在 **Details of “Hex Dominant Method” Method→Scope→Geometry** 菜单下单击 **Apply** 按钮，完成实体的选取，并将 **Details of “Hex Dominant Method” Method→Definition** 菜单下的 **Method** 选项设定为 **Hex Dominant**；单击 **Project→Model (B4)→Mesh** 选项，单击工具栏中的 **Solve** 按钮进行网格划分。

step 4

添加约束。首先对沉头孔及零件底面添加无摩擦约束，单击 **Project→Model(B4)→Static Structural (B5)** 选项，单击工具栏中的 **Supports** 选项，在其下拉菜单中选择 **Frictionless Support** 选项，按住 **Ctrl** 键依次选中 4 个沉头孔平面及零件底面，单击 **Details of “Frictionless Support”→Scope** 菜单下的 **Apply** 按钮，完成无摩擦约束的添加，结果如图 14.81 所示；其次对沉头孔圆柱面添加圆柱约束，单击工具栏中的 **Supports** 选项，在其下拉菜单中选择 **Cylindrical Support** 选项，按住 **Ctrl** 键依次选中 4 个沉头螺钉孔圆柱面，在 **Details of “Cylindrical Support”→Scope** 菜单下单击 **Apply** 按钮，完成圆柱约束的添加，结果如图 14.82 所示。

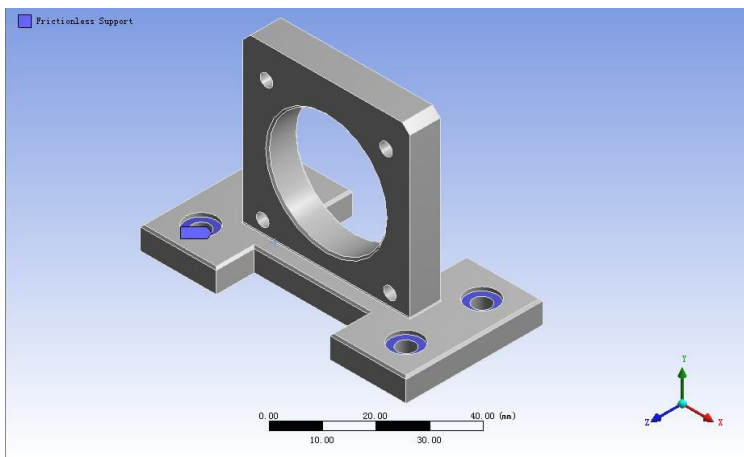


图 14.81 无摩擦约束添加结果

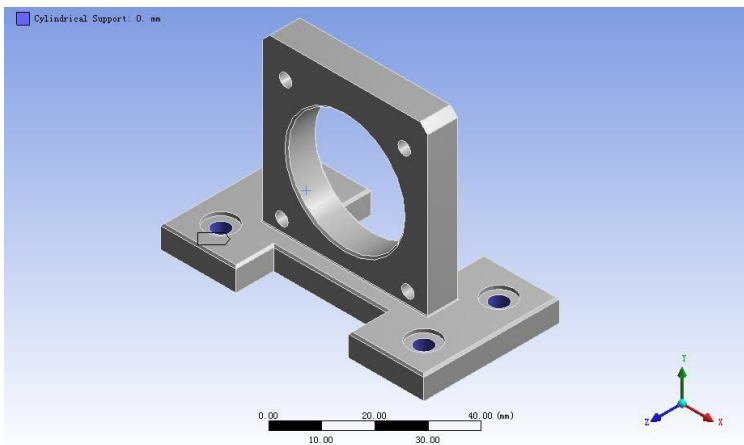


图 14.82 圆柱约束添加结果



step 5

施加载荷。单击 **Project**→**Model (B4)**→**Static Structural (B5)** 选项, 单击工具栏中的 **Loads** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Remote Force** 选项, 选取支架前端面, 在 **Details of “Remote Force”**→**Geometry** 菜单下单击 **Apply** 按钮, 完成载荷面的选取; 将 **Details of “Remote Force”**→**Coordinate System** 选项设定为 **Coordinate System**, 依次在 X, Y, Z 三个分量中填入 35mm, 26mm, 60mm; 将 **Details of “Remote Force”**→**Define By** 选项设定为 **Components**, 依次在 X, Y, Z 三个分量中填入 0, -5N, 0, 远程载荷设置细节如图 14.83 所示。施加的远程载荷如图 14.84 所示。

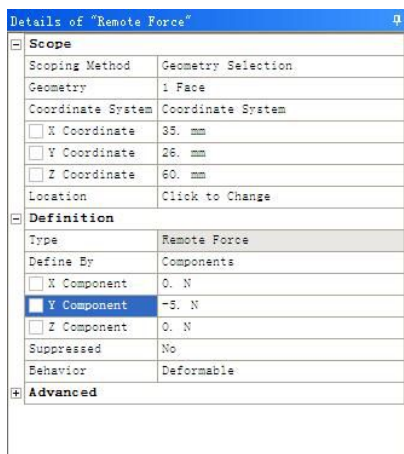


图 14.83 远程载荷设置细节

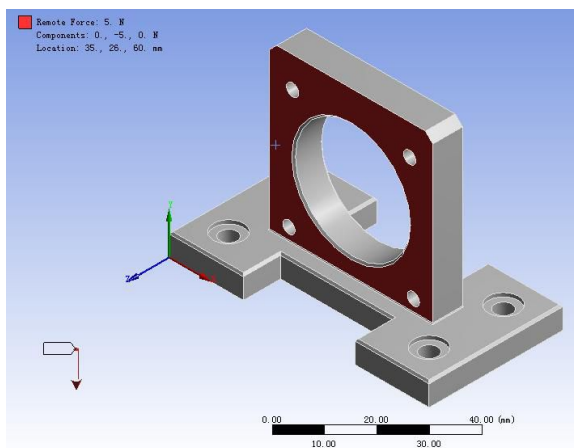


图 14.84 远程载荷施加结果

step 6

设定所需的求解结果。单击 **Project**→**Model (B4)**→**Static Structural (B5)**→**Solution (B6)** 选项, 单击工具栏中的 **Stress** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Equivalent (von-Mises)** 选项; 单击工具栏中的 **Strain** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Equivalent (von-Mises)** 选项; 单击工具栏中的 **Deformation** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Total** 选项; 单击工具栏下面的 **Deformation** 选项, 在其下拉菜单中选择 **Directional** 选项, 并将 **Details of “Directional Deformation”**→**Definition** 菜单下的 **Orientation** 选项设定为 **Z Axis**。至此, 静力分析设定完毕, 结果如图 14.85 所示。

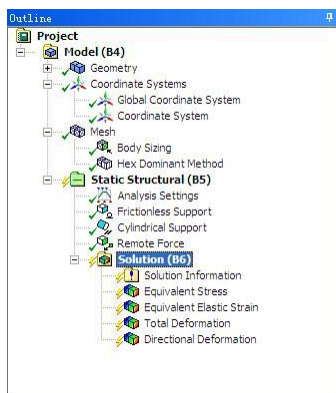


图 14.85 静力分析参数设定结果

step 7

进行求解及结果查看。单击 **Model (B4)** 中 **Static Structural (B5)** 栏下的 **Solution** 选项,



单击工具栏中的 Solve 按钮, 开始进行求解。依次单击 Model (B4) → Static Structural (B5) → Solution (B6) → Equivalent Stress、Equivalent Elastic Strain、Total Deformation 等选项, 可对求解的结果进行分析。求解得到的应力云图、应变云图、总变形图以及 Z 方向变形图分别如图 14.86~图 14.89 所示。

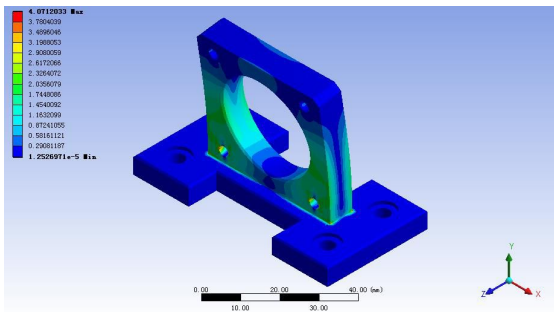


图 14.86 静力分析应力云图

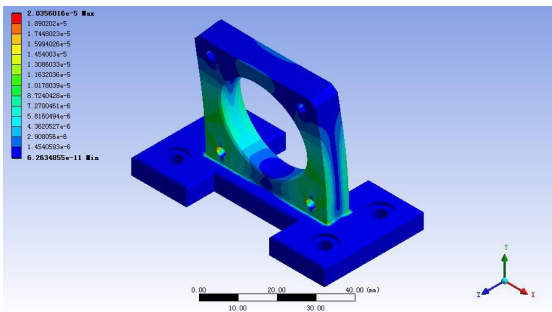


图 14.87 静力分析应变云图

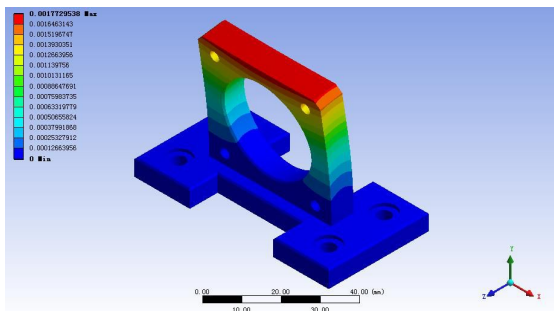


图 14.88 静力分析总变形图

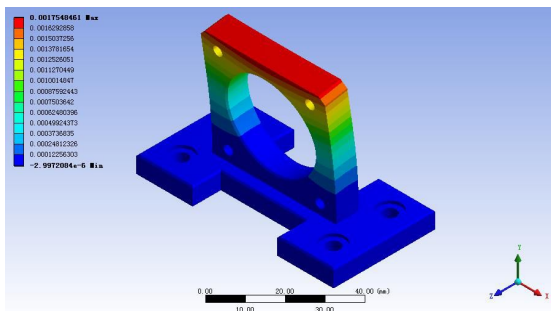


图 14.89 静力分析 Z 方向变形图

通过对优化后的电机支架进行静力分析可知, 优化后的结构强度、刚度均满足使用要求。因此, ANSYS Workbench 中的拓扑优化模块实现了在不改变零件使用性能的前提下, 对零件进行优化的功能。

14.5 小结

本章通过实例, 从静力学、动力学以及优化设计等方面阐述了 ANSYS 有限元分析软件在机械工程中的应用。ANSYS 有限元分析一般包括建立模型、施加载荷、求解检查结果 3 个步骤。其中, 建模的方式主要有 3 种: 在经典 ANSYS 界面下直接建模、利用 ANSYS Workbench 仿真平台进行建模以及利用与 ANSYS Workbench 相链接的建模软件进行建模。在参数设置环节, 用户可以根据自己的需要, 查看或添加感兴趣的结果。对 ANSYS Workbench 拓扑结构优化功能的应用分析表明, 其能够对零件进行结构优化, 以达到提高零件综合性能的目的。

第 15 章 ANSYS 在土木工程中的应用

本章包括

- ◆ 实例详解 1：椭圆型双层网壳结构静力分析
- ◆ 实例详解 2：空间张弦梁结构设计分析
- ◆ 实例详解 3：空腹梁楼盖组合结构模态分析
- ◆ 实例详解 4：悬链面薄膜结构找形分析

土木工程是一个历史悠久的学科，它与人们的生活、社会的进步息息相关。17 世纪中叶以前，人们在修建各种设施时主要靠经验，还没有什么设计理论，只能依靠泥土、木料及其他天然材料来从事营造活动。后来，随着社会经济的发展，各种新的建筑材料不断涌现，尤其是钢筋混凝土和钢材的出现，使得土木工程出现突飞猛进的发展。现代土木工程能适应各类工程建设高速发展的要求，大规模、大跨度、高耸、轻型、大型、精密、设备现代化的建筑物陆续兴建。这些建筑物往往既要求高质量和快速施工，又要求高经济效益。这就向土木工程师们提出了新的课题：如何在保证建筑物美观、经济和易施工的基础上，又保证结构的安全可靠呢？不管怎么说，对一个结构而言，其结构的安全可靠才是根本。因此，对这些土木结构展开结构性能分析势在必行。但是，想要用手算来完成一个大跨复杂结构的设计，几乎是不可能的。ANSYS 有限元软件恰恰对这种体型复杂的建筑物的静动力、线性或非线性等特性分析具有强大的优势，能够为确保结构的安全、可靠提供科学依据。因此，对于现代结构工程师而言，掌握 1~3 种大型有限元分析软件将是必不可少的技能要求。

土木工程领域包含的学科众多，有桥梁工程、道路工程、房屋建筑工程、岩土工程等，本章将介绍的重点放在房屋建筑工程上，阐述 ANSYS 有限元在不同新型结构设计中的应用。在大跨屋盖结构设计中，以椭圆双层网壳结构为实例，阐述 ANSYS 如何对网架网壳结构进行建模并进行结构分析；在新型钢结构设计中，则关注近几年发展强劲的张弦梁结构，以某实际工程设计为实例，详细介绍该类结构的设计计算方法；在大跨楼盖结构设计中，则关注近十几年来在国内应用较为广泛的新型空腹楼盖组合结构，以某实际工程为蓝图，介绍该类结构的建模方法及动力学特性；在柔性结构设计中，以悬链面薄膜结构的找形分析为实例介绍具体的应用过程。

15.1 实例详解 1：椭圆型双层网壳结构静力分析

本节对某实际椭圆型双层网壳结构工程进行静力分析。

15.1.1 问题描述与分析

如图 15.1 所示的椭圆型双层网壳结构，长轴 42m，短轴 30m，矢高 6m，网格数环向 20，径向 4，网架厚度 1.5m。其屋面上弦承受 1000N/m^2 的均布载荷，网壳周边的固定约束在刚度很大

的混凝土柱子上, 可视为三向线位移固定约束支座, 网壳结构材料为无缝钢管, 其弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, 泊松比为 0.3。为简化建模过程, 所有上弦杆均采用 $\phi 153 \times 5.0$, 下弦杆均采用 $\phi 114 \times 4.0$, 腹杆均采用 $\phi 89 \times 4.0$ 。试计算网壳结构的变形。

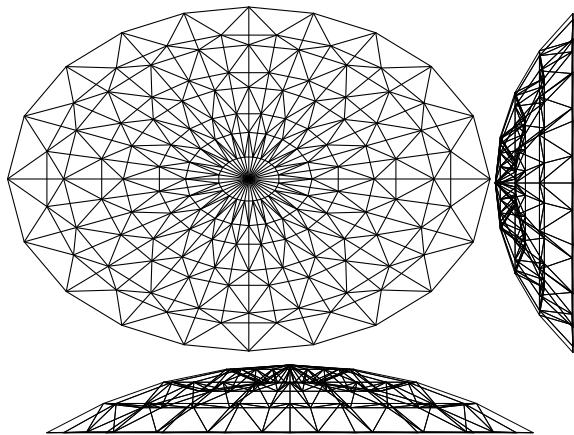


图 15.1 椭圆型双层网壳结构示意图

采用坐标节点输入法的建模方法建立该实例的三维模型, 选择 LINK8 单元模拟网壳杆单元。

15.1.2 求解过程

15.1.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品, 在 Working Directory 输入栏中输入工作目录: C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 15\15-1, 在 Job Name 栏中输入工作文件名: Chapter15-1。以上参数设置完毕后, 单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

15.1.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 Main Menu → Preferences 命令, 弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框, 在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框, 过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete 命令, 弹出 Element Types 对话框, 单击 Add 按钮, 弹出 Library of Element Types 对话框, 在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link 中的 3D spar 8 单元, 如图 15.2 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框, 单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

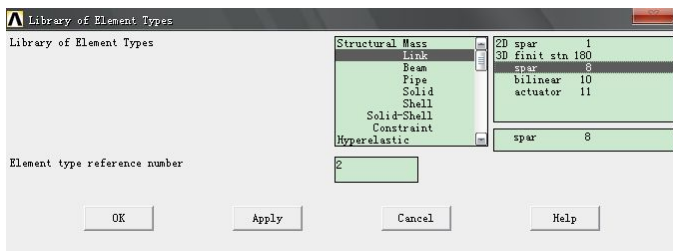




图 15.2 Library of Element Types 对话框

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Define Real Constants 对话框，依次单击 Add 按钮，弹出 Real Constant Set Number 1, for LINK8 对话框，定义杆件截面面积为 0.001068m^2 （腹杆），如图 15.3 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。依次定义其他两种规格杆件的截面面积为 0.001582 m^2 （下弦）、 0.002011 m^2 （上弦）。在 Define Real Constants 对话框中单击 Close 按钮，关闭该对话框。

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 $2.1\text{e}11$ ，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 15.4 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

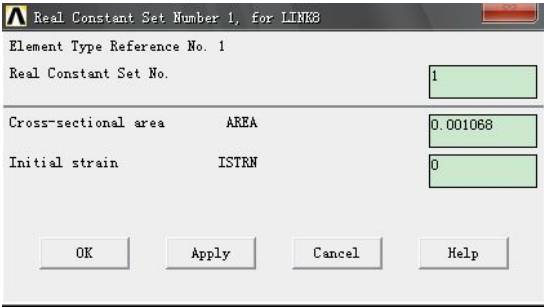


图 15.3 Real Constant Set Number1, for LINK8 对话框

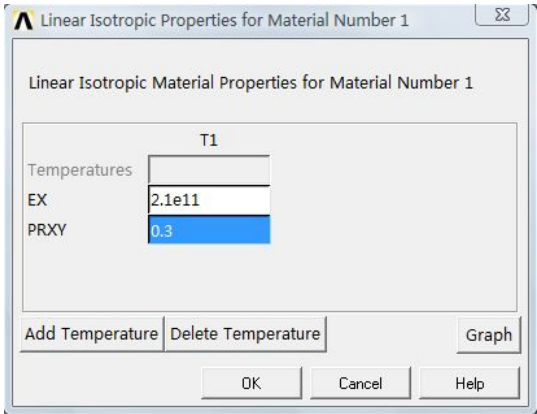


图 15.4 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 5 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

15.1.2.3 创建网壳结构模型

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS 命令，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 X,Y,Z Location in active CS 栏中依次分别输入表 15.1 中的节点坐标值，如图 15.5 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



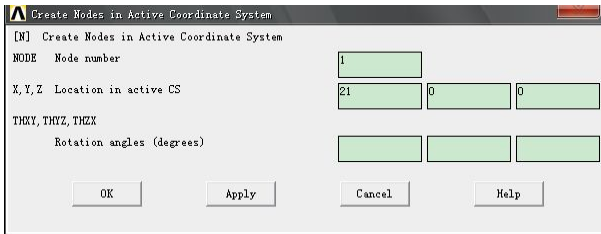


图 15.5 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

表 15.1 节点坐标值 (单位: m)

1	21.000	0.000	0.000	54	-2.963	7.712	-4.471	108	-8.523	-9.928	-2.587
2	17.575	2.407	-0.053	55	-3.182	5.256	-3.670	109	-5.219	-8.575	-2.209
3	16.116	0.000	-2.587	56	-1.499	3.917	-5.616	110	-5.795	-6.791	-4.471
4	12.806	1.763	-2.209	57	-1.059	1.774	-4.408	111	-3.182	-5.256	-3.670
5	10.920	0.000	-4.471	58	-11.050	12.756	0.000	112	-2.931	-3.447	-5.616
6	7.786	1.075	-3.670	59	-11.537	9.682	-0.053	115	-1.059	-1.774	-4.408
7	5.515	0.000	-5.616	60	-8.523	9.928	-2.587	114	-5.641	-14.449	0.000
8	2.612	0.361	-4.408	61	-8.436	7.154	-2.209	115	-2.407	-12.548	-0.053
9	0.000	0.000	-6.000	62	-5.794	6.791	-4.471	116	-4.355	-11.263	-2.587
10	19.549	5.479	0.000	63	-5.140	4.368	-3.670	117	-1.763	-9.271	-2.209
11	15.256	6.625	-0.053	64	-2.931	3.447	-5.616	118	-2.963	-7.711	-4.471
12	15.021	4.237	-2.587	65	-1.718	1.476	-4.408	119	-1.075	-5.686	-3.670
15	11.156	4.867	-2.209	66	-15.890	9.807	0.000	120	-1.499	-3.917	-5.616
14	10.187	2.886	-4.471	67	-15.256	6.625	-0.053	121	-0.361	-1.916	-4.408
15	6.778	2.975	-3.670	68	-12.236	7.615	-2.587	122	0.000	-15.000	0.000
16	5.146	1.462	-5.616	69	-11.156	4.867	-2.209	123	2.407	-12.548	-0.053
17	2.269	1.009	-4.408	70	-8.310	5.198	-4.471	124	0.000	-11.698	-2.587
18	15.890	9.807	0.000	71	-6.778	2.975	-3.670	125	1.763	-9.271	-2.209
19	11.537	9.682	-0.053	72	-4.201	2.636	-5.616	126	0.000	-8.012	-4.471
20	12.236	7.615	-2.587	73	-2.269	1.009	-4.408	127	1.075	-5.686	-3.670
21	8.436	7.154	-2.209	74	-19.549	5.479	0.000	128	0.000	-4.070	-5.616
22	8.310	5.198	-4.471	75	-17.575	2.407	-0.053	129	0.361	-1.916	-4.408
23	5.140	4.368	-3.670	76	-15.021	4.237	-2.587	150	5.641	-14.449	0.000
24	4.201	2.636	-5.616	77	-12.806	1.763	-2.209	151	7.129	-11.615	-0.053
25	1.718	1.476	-4.408	78	-10.187	2.886	-4.471	152	4.355	-11.263	-2.587
26	11.050	12.756	0.000	79	-7.786	1.075	-3.670	153	5.219	-8.575	-2.209
27	7.129	11.615	-0.053	80	-5.146	1.462	-5.616	154	2.962	-7.712	-4.471
28	8.523	9.928	-2.587	81	-2.612	0.361	-4.408	155	3.182	-5.256	-3.670
29	5.219	8.575	-2.209	82	-21.000	0.000	0.000	156	1.499	-3.917	-5.616

(续表)

30	5.795	6.791	-4.471	83	-17.575	-2.407	-0.053	157	1.059	-1.774	-4.408
31	3.182	5.256	-3.670	84	-16.116	0.000	-2.587	158	11.050	-12.756	0.000
32	2.931	3.447	-5.616	85	-12.806	-1.763	-2.209	159	11.537	-9.682	-0.053
33	1.059	1.774	-4.408	86	-10.920	0.000	-4.471	140	8.523	-9.928	-2.587
34	5.641	14.449	0.000	87	-7.786	-1.075	-3.670	141	8.436	-7.154	-2.209
35	2.407	12.548	-0.053	88	-5.515	0.000	-5.616	142	5.794	-6.791	-4.471
36	4.355	11.263	-2.587	89	-2.612	-0.361	-4.408	143	5.140	-4.368	-3.670
37	1.763	9.271	-2.209	90	-19.549	-5.479	0.000	144	2.931	-3.447	-5.616
38	2.963	7.711	-4.471	91	-15.256	-6.625	-0.053	145	1.718	-1.476	-4.408
39	1.075	5.686	-3.670	92	-15.021	-4.237	-2.587	146	15.890	-9.807	0.000
40	1.499	3.917	-5.616	93	-11.156	-4.867	-2.209	147	15.256	-6.625	-0.053
41	0.361	1.916	-4.408	94	-10.187	-2.886	-4.471	148	12.236	-7.615	-2.587
42	0.000	15.000	0.000	95	-6.778	-2.975	-3.670	149	11.156	-4.867	-2.209
43	-2.407	12.548	-0.053	96	-5.146	-1.461	-5.616	150	8.310	-5.198	-4.471
44	0.000	11.698	-2.587	97	-2.269	-1.009	-4.408	151	6.778	-2.975	-3.670
45	-1.763	9.271	-2.209	98	-15.890	-9.807	0.000	152	4.201	-2.636	-5.616
46	0.000	8.012	-4.471	99	-11.537	-9.682	-0.053	153	2.269	-1.009	-4.408
47	-1.075	5.686	-3.670	100	-12.236	-7.615	-2.587	154	19.549	-5.479	0.000
48	0.000	4.070	-5.616	101	-8.436	-7.154	-2.209	155	17.575	-2.407	-0.053
49	-0.361	1.916	-4.408	102	-8.310	-5.198	-4.471	156	15.021	-4.237	-2.587
50	-5.641	14.449	0.000	103	-5.140	-4.368	-3.670	157	12.806	-1.763	-2.209
51	-7.129	11.615	-0.053	104	-4.201	-2.636	-5.616	158	10.187	-2.886	-4.471
52	-4.355	11.263	-2.587	105	-1.718	-1.476	-4.408	159	7.786	-1.075	-3.670
53	-5.219	8.575	-2.209	106	-11.050	-12.756	0.000	160	5.146	-1.462	-5.616
54	-2.963	7.712	-4.471	107	-7.129	-11.615	-0.053	161	2.612	-0.361	-4.408



该节点坐标数值由 AutoCAD 软件提供。

step 2 选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Numbering** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，打开 **Node Numbers** 选项，单击 **OK** 按钮退出该对话框，则显示如图 15.6 所示的节点编号。



如果要考虑屋面自重，则需要采用关键点 **Keypoints** 建立模型，在点上施加 **Mass21** 单元，并划分网格方可实现。

step 3 选择 **Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes** 命令，弹出 **Element Attributes** 对话框，如图 15.7 所示，在 **Real constant set number** 下拉列

表框中选择 3 选项，其余选项保持默认设置，单击 OK 按钮退出。选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbers→Thru Nodes 命令，弹出 Elements from Nodes 对话框，如图 15.8 所示，依次选择上弦节点，建成上弦杆单元 Elements，单击 OK 按钮退出。再重新执行步骤 2，分别在 Real constant set number 下拉列表框中选择 2, 1，并依次连接下弦杆单元和腹杆单元。

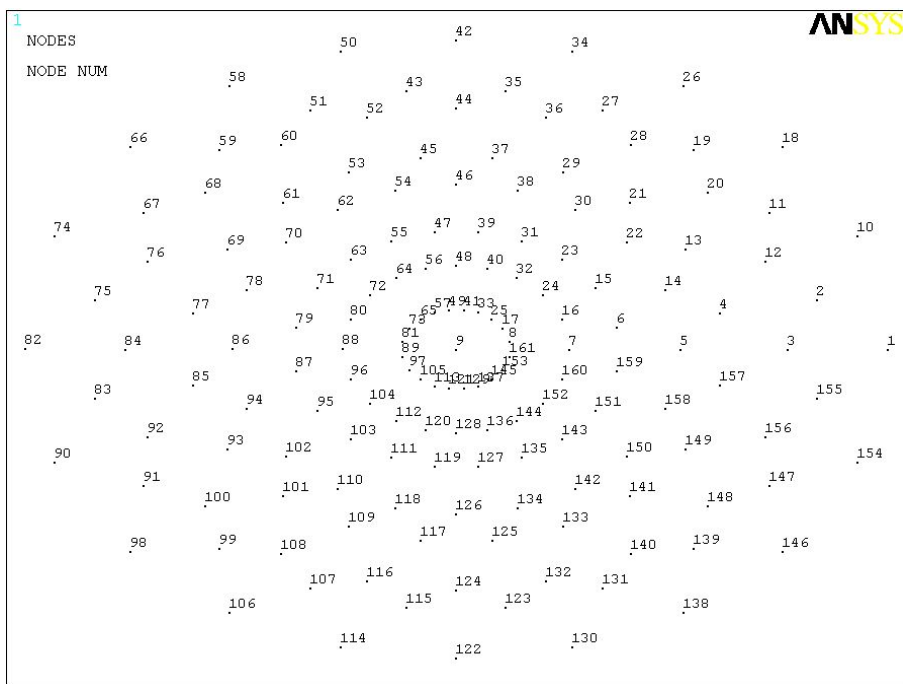


图 15.6 Nodes 节点编号

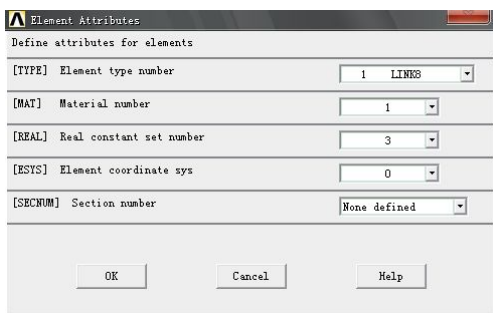


图 15.7 Element Attributes 对话框



图 15.8 Elements from Nodes 对话框

框



该操作为通过鼠标选择节点创建单元，并赋予其相应的单元实常数，也可在输入栏中依次输入节点编号，分别组成上弦、下弦和腹杆单元。

step 4

选择 **Utility Menu→Plot→Elements** 命令，显示如图 15.9 所示的模型。

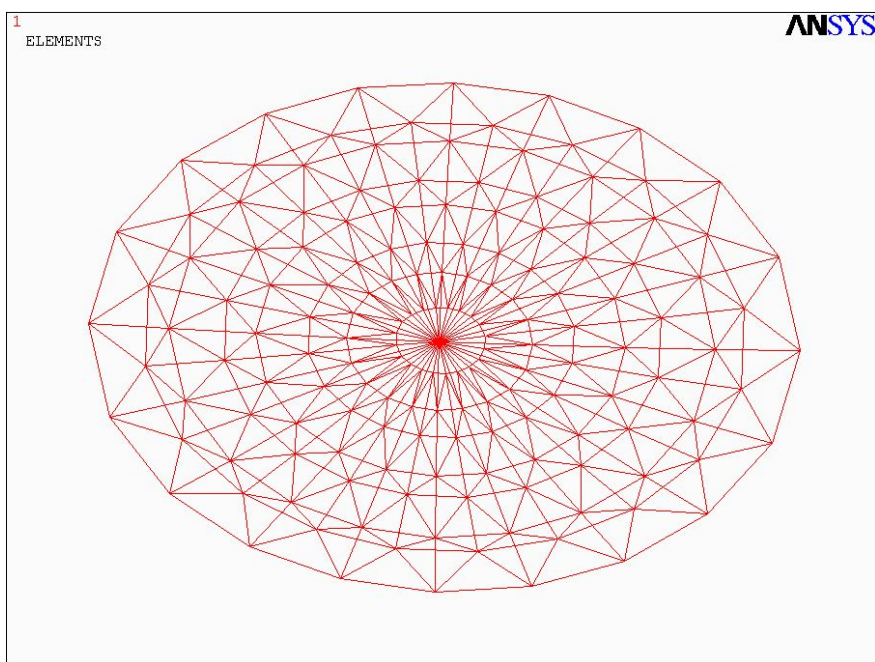


图 15.9 模型单元图

step 5

选择 **Utility Menu→PlotCtrls→Numbering** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，在 **Elem/Attrib numbering** 下拉列表框中选择 **Real const num** 选项，单击 **OK** 按钮退出该对话框，显示如图 15.10 所示的单元实常数编号。

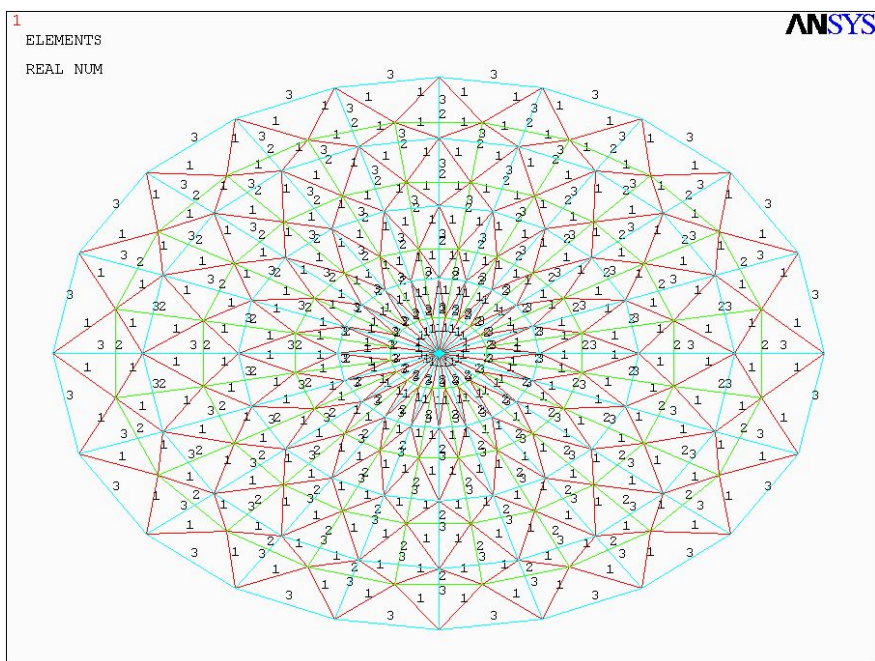


图 15.10 单元实常数编号

step 6 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

15.1.2.4 加载求解

step 1 选择 Utility Menu→PlotCtrls→View Setting→Viewing Direction 命令，弹出 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中分别输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，用鼠标拾取周边节点，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX, UY, UZ 选项，如图 15.11 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

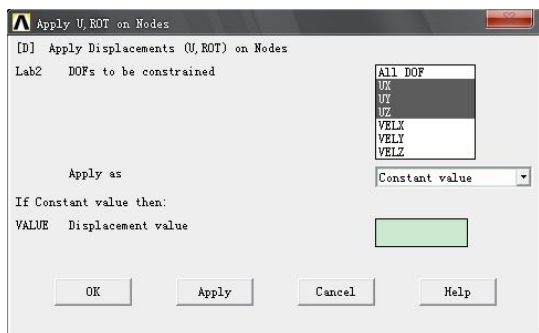


图 15.11 Apply U, ROT on Nodes 对话框



该操作为对网壳进行固定约束，即不允许结构边界有 X、Y、Z 三个方向的线位移。

step 3 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes 命令，弹出 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，用鼠标拾取上弦节点 3、12、20、28、36、44、52、60、68、76、84、92、100、108、116、124、152、140、148 和 156，单击 Apply 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Direction of force/mom 下拉列表框中选择 FZ 选项，在 Force/moment value 输入栏中输入 20620，如图 15.12 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。重复该操作，在上弦节点 5、14、22、30、38、46、54、62、70、78、86、94、102、110、118、126、154、142、150 和 158 上施加 15860N 的集中力，在节点 7、16、24、32、40、48、56、64、72、80、88、96、104、112、120、128、156、144、152 和 160 上施加 7790N 的集中力，在节点 9 上施加 30040N 的集中力。

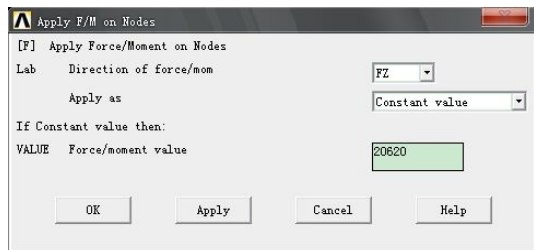


图 15.12 Apply F/M on Nodes 对话框



该操作为对网壳施加集中载荷，其数值大小即将面载荷等效为节点集中载荷。

step 4

选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**View Setting**→**Viewing Direction** 命令，弹出 **Viewing Direction** 对话框，在 **XV,YV,ZV Coords of view point** 输入栏中分别输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，单击 **OK** 按钮关闭该对话框，显示如图 15.13 所示的加载结果。

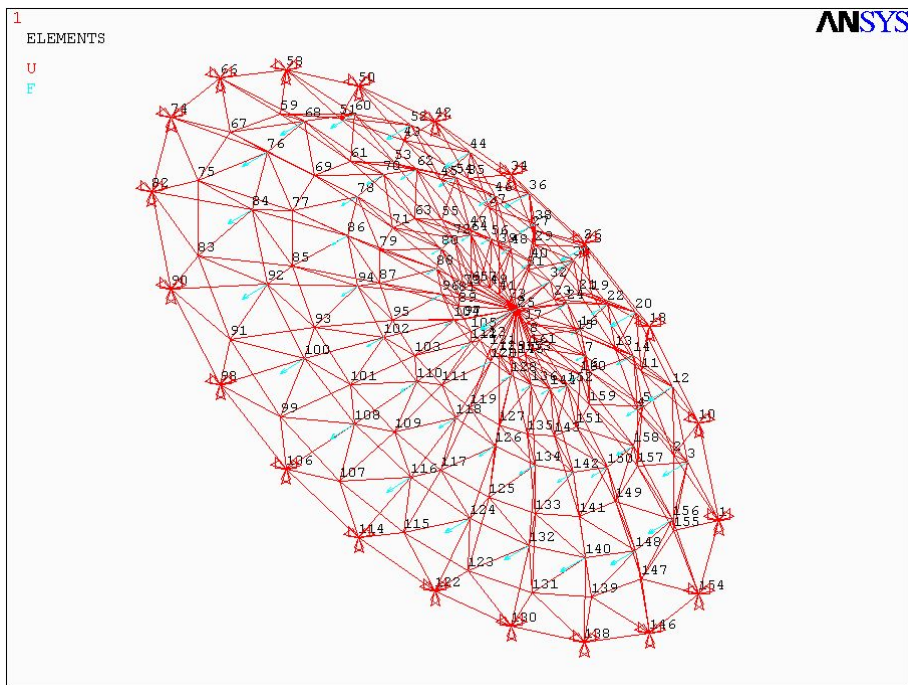


图 15.13 加载结果

step 5

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Static**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 6

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**Current LS** 命令，弹出 **Solve Current Load Step** 对话框，单击 **OK** 按钮，ANSYS 开始求解计算。

step 7

求解结束时，弹出 **Note** 对话框，单击 **Close** 按钮关闭该对话框。

step 8

选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

15.1.2.5 查看求解结果

step 1

选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Deformed Shape** 命令，弹出 **Plot Deformed Shape** 对话框，在 **KUND Items to be plotted** 栏中选择 **Def + undef edge** 单选按钮，单击 **OK** 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的轮廓，如图 15.14 所示。

step 2

选择 **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solu** 命令，弹出 **Contour Nodal Solution Data** 对话框，在 **Item to be contoured** 列表框中依次展开 **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Displacement vector sum** 选项，其余选项采用默认设置。

置，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.15 所示的位移场分布等值线图。

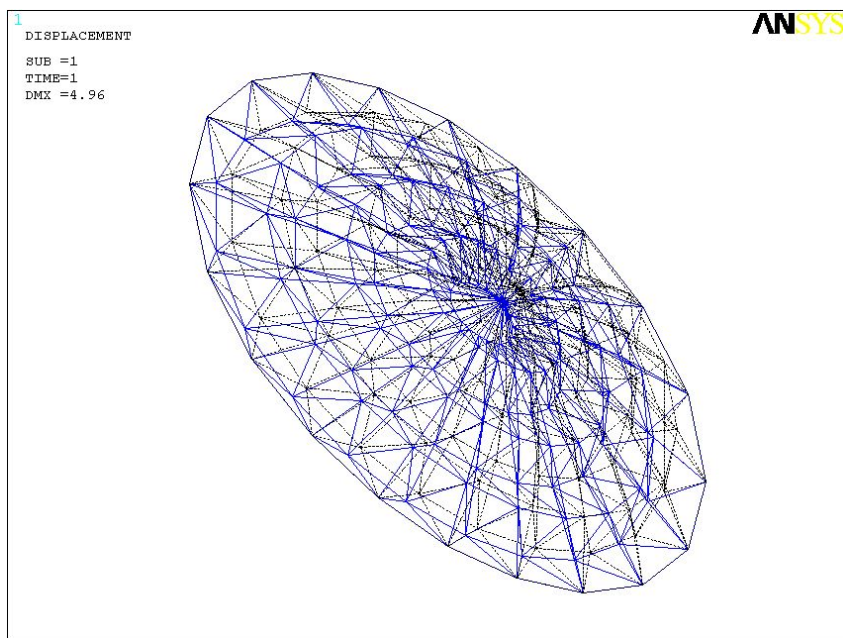


图 15.14 变形后的几何形状和未变形的轮廓

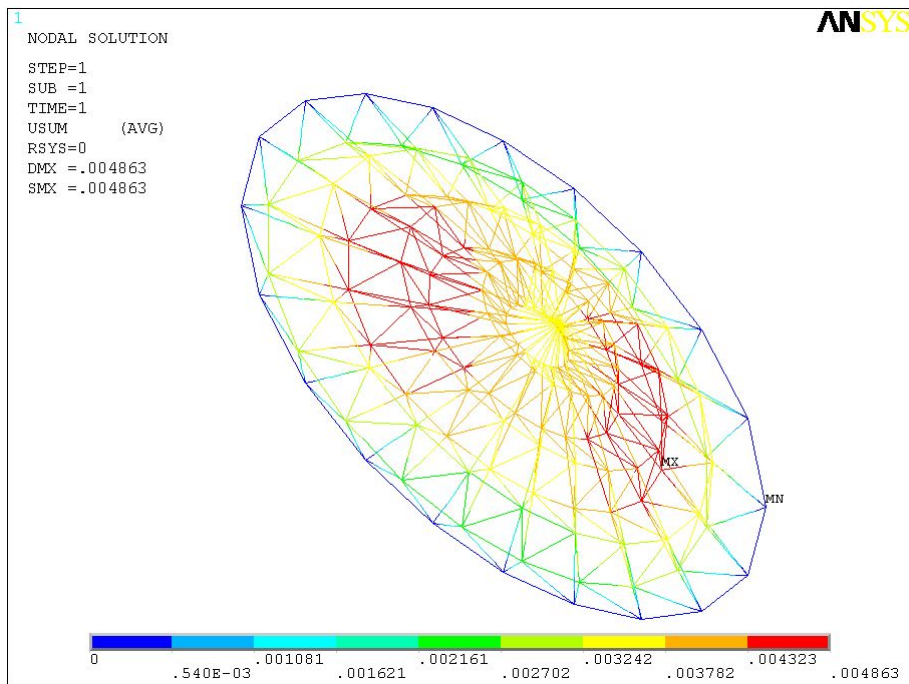


图 15.15 位移场分布等值线图

step 3

选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

15.1.3 命令流

```
/PREP7      !进入前处理器
N,1,21.000,0.000,0.000      ! 定义节点
N,2,17.575,2.407,-0.053
N,3,16.116,0.000,-2.587

... .. !此部分类似，按照表 15.1 所示的坐标值进行输入

N,160,5.146,-1.462,-5.616
N,161,2.612,-0.361,-4.408

ET,1,LINK8      !定义单元类型为杆单元
R,1,1.068141e-003,0.000000e+000,, , , ,      !定义与单元类型相一致的实常数
R,2,1.382301e-003,0.000000e+000,, , , ,
R,3,2.010619e-003,0.000000e+000,, , , ,
UIMP,1,EX, , , 2.060e+008      !修改材料属性
UIMP,1,PRXY, , , 3.000e-001
TYPE,1          !设置单元类型
MAT,1           !设置材料类型
REAL,1          !指定单元实常数型号
ESYS,0          !设置单元坐标系统，0：使用单元定义的坐标系统方向（默认）
TSHAP,LINE      !制定目标单元的形状为 LINE（2D 直线）

!创建腹杆单元
*do,i,1,8,1
  e,i,i+1
*enddo
j=10
k=9
*do,i,1,19,1
*do,j,1+k,7+k,1
  e,j,j+1
*enddo
  k=j+1
*enddo
*do,i,17,161,8
  e,9,i
*enddo
*do,i,2,8,2
  e,i,i+8
*enddo
*do,i,2,6,2
  e,i,i+10
*enddo
j=11
k=10
*do,i,1,18,1
*do,j,1+k,7+k,2
  e,j,j+7
```

```

*enddo
k=j+1
*enddo
j=11
*do,i,1,18,1
*do,j,j,4+j,2
    e,j,j+9
*enddo
j=j+4
*enddo
*do,i,1,7,2
    e,i,i+154
    e,i+2,i+154
*enddo

REAL,2          !指定单元实常数型号
!创建下弦横向杆单元
*do,i,2,8,2
    e,i,i+9
*enddo
j=11
*do,i,1,18,1
    *do,j,j,j+6,2
        e,j,j+8
    *enddo
    j=j+2
*enddo
*do,i,2,8,2
    e,i,i+153
*enddo
!创建下弦径向杆单元
*do,j,2,6,2
    e,j,j+2
*enddo
j=11
*do,i,1,19,1
    *do,j,j,4+j,2
        e,j,j+2
    *enddo
    j=j+4
*enddo

REAL,3          !指定单元实常数型号
!创建上弦横向杆单元
*do,i,1,7,2
    e,i,i+9
*enddo
j=10
*do,i,1,18,1
    *do,j,j,j+6,2
        e,j,j+8

```



```

*enddo
j=j+2
*enddo
*do,i,1,7,2
e,i,i+153
*enddo
!创建上弦径向杆单元
*do,j,1,7,2
e,j,j+2
*enddo
j=10
*do,i,1,19,1
*do,j,j,4+j,2
e,j,j+2
*enddo
e,j+2,9
j=j+4
*enddo

D,1, , , , , , UX,UY,UZ, , , !创建约束
*do,i,10,154,8
D,i, , , , , , UX,UY,UZ, , ,
*enddo

F,3,FZ, 20620 !施加集中载荷
*do,i,12,156,8
F,i,FZ, 20620
*enddo
F,5,FZ, 15860
*do,i,14,158,8
F,i,FZ, 15860
*enddo
F,7,FZ,7790
*do,i,16,160,8
F,i,FZ,7790
*enddo
F,9,FZ,30040
SAVE

/SOL !求解
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
SAVE

/POST1 !进入后处理器
PLDISP,2 !显示结构位移, 2 表示重叠显示变形前后的形状

/EFACET,1 !指定显示单元的边界面号
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0 !用等值线云图显示结果
FINISH

```



15.2 实例详解 2：空间张弦梁结构设计分析

15.2.1 问题描述与分析

如图 15.16 所示的张弦梁结构，跨度 20.9m，矢高 2.2m，竖向撑杆间距 3m，共 5 根，拱梁采用 H 型钢，截面 $300 \times 400 \times 10 \times 16$ （宽 \times 高 \times 腹板厚 \times 翼缘板厚），撑杆采用 $\Phi 76 \times 4.0$ 无缝钢管，索采用 $\Phi 5 \times 19$ 单根缆索。材料属性：钢材弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ，密度为 7840kg/m^3 ，热膨胀系数为 1.1×10^{-5} ；索体弹性模量为 $1.9 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ，密度为 7300kg/m^3 ，热膨胀系数为 1.0×10^{-5} ；泊松比为 0.3。载荷：结构自重、预应力、屋面载荷 $0.8 \times 10^3 \text{N/m}^2$ 。试进行该结构的设计分析。

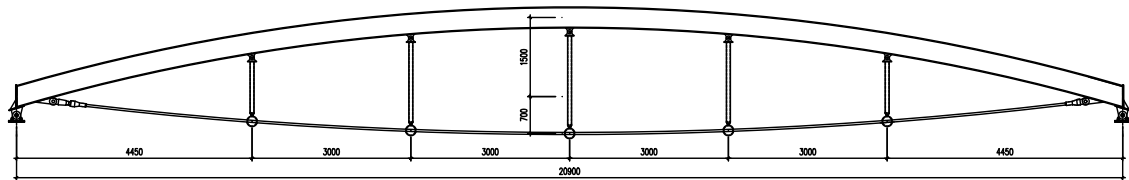


图 15.16 张弦梁结构示意图

采用坐标节点输入法的建模方法建立该实例的三维模型，选择 BEAM188 单元模拟 H 型拱梁，采用 LINK10 单元模拟撑杆，采用 LINK8 单元模拟索。

15.2.2 求解过程

15.2.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 15\15-2，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter15-2。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

15.2.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 中的 3D 2 node 188 单元，如图 15.17 所示，单击 Apply 按钮，继续选择 Link10 单元和 Link8 单元，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Define Real Constants 对话框，依次单击 Add 选项，弹出 Real Constant Set Number 2, for LINK8 对话框，定义撑杆截面面积为 0.0009048m^2 ，如图 15.18 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。同理定义索截面面积为 $3.73 \times 10^{-6} \text{m}^2$ ，在 Define Real Constants 对话框中单击 Close 按钮，关闭该对话框。

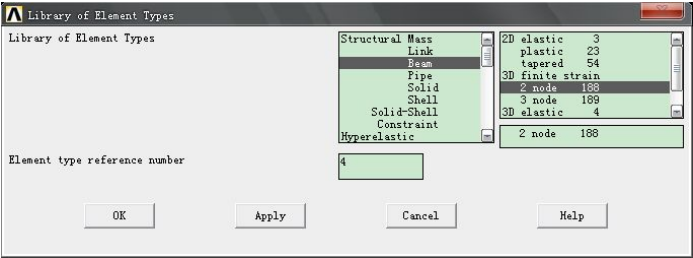


图 15.17 Library of Element Types 对话框

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Sections→Beam→Common Sections 命令，弹出 Beam Tool 对话框，在 Sub-Type 栏中选择“工”字形截面，并在 W1、W2、W3、t1、t2、t3 中输入截面参数，如图 15.19 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

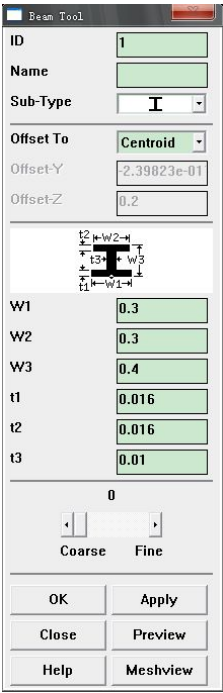


图 15.19 Beam Tool 对话框

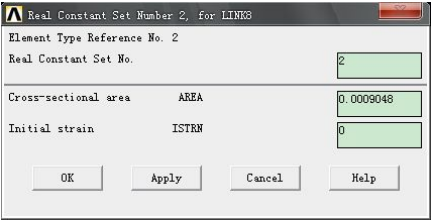


图 15.18 Real Constant Set Number 2, for LINK8 对话框

step 5 选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.1e11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 15.20 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Density 选项，在 Density for Material Number 1 对话框中输入 7840，如图 15.21 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。展开 Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic 选项，弹出 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框，在 ALPX 栏中输入热膨胀系数 1.1E-005，如图 15.22 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。按照上述过程，依次定义撑杆单元材料属性 Material Model Number 2，定义索单元材料属性 Material Model Number 3，然后在

Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

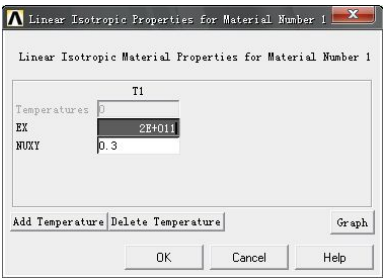


图 15.20 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

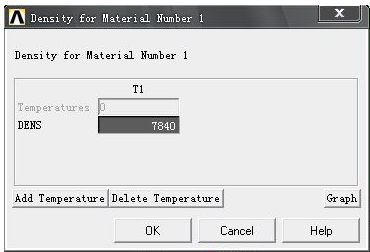


图 15.21 Density for Material Number 1

Material Number 1 对话框

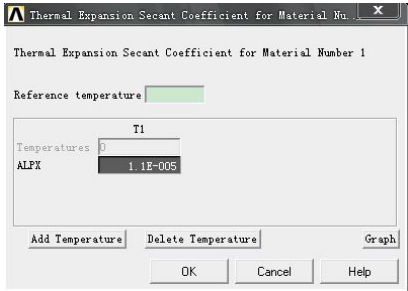


图 15.22 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框

step 6 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

15.2.2.3 创建张弦梁模型

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 X,Y,Z Location in active CS 栏中依次输入表 15.2 中所示的关键点坐标值，如图 15.23 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

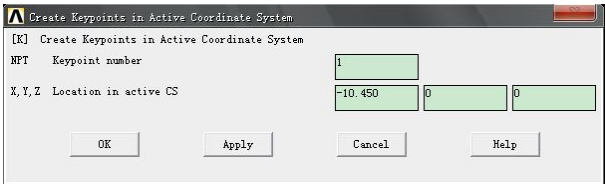


图 15.23 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

表 15.2 关键点坐标值（单位：m）

1	-10.450	0.000	0.00	17	-2.500	1.416	0.00	33	5.500	1.091	0.00
			0				0				0
2	-10.000	0.129	0.00	18	-2.000	1.446	0.00	34	6.000	1.012	0.00
			0				0				0
3	-9.500	0.265	0.00	19	-1.500	1.470	0.00	35	6.500	0.927	0.00
			0				0				0

4	-9.000	0.393	0.00 0	20	-1.000	1.487	0.00 0	36	7.000	0.835	0.00 0
5	-8.500	0.515	0.00 0	21	-0.500	1.497	0.00 0	37	7.500	0.735	0.00 0
6	-8.000	0.628	0.00 0	22	0.000	1.500	0.00 0	38	8.000	0.628	0.00 0
7	-7.500	0.735	0.00 0	23	0.500	1.497	0.00 0	39	8.500	0.515	0.00 0

(续表)

8	-7.000	0.835	0.00 0	24	1.000	1.487	0.00 0	40	9.000	0.393	0.00 0
9	-6.500	0.927	0.00 0	25	1.500	1.470	0.00 0	41	9.500	0.265	0.00 0
10	-6.000	1.012	0.00 0	26	2.000	1.446	0.00 0	42	10.00 0	0.129	0.00 0
11	-5.500	1.091	0.00 0	27	2.500	1.416	0.00 0	43	10.45 0	0.000	0.00 0
12	-5.000	1.162	0.00 0	28	3.000	1.379	0.00 0	44	-6.00 0	-0.47 0	0.00 0
15	-4.500	1.227	0.00 0	29	3.500	1.335	0.00 0	45	-3.00 0	-0.64 3	0.00 0
14	-4.000	1.284	0.00 0	30	4.000	1.284	0.00 0	46	0.000	-0.70 0	0.00 0
15	-3.500	1.335	0.00 0	31	4.500	1.227	0.00 0	47	3.000	-0.64 3	0.00 0
16	-3.000	1.379	0.00 0	32	5.000	1.162	0.00 0	48	6.000	-0.47 0	0.00 0



该节点坐标数值由 AutoCAD 软件提供。

step 2 选择 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，打开 Keypoint Numbers 选项，单击 OK 按钮退出该对话框，则显示如图 15.24 所示的关键点编号。

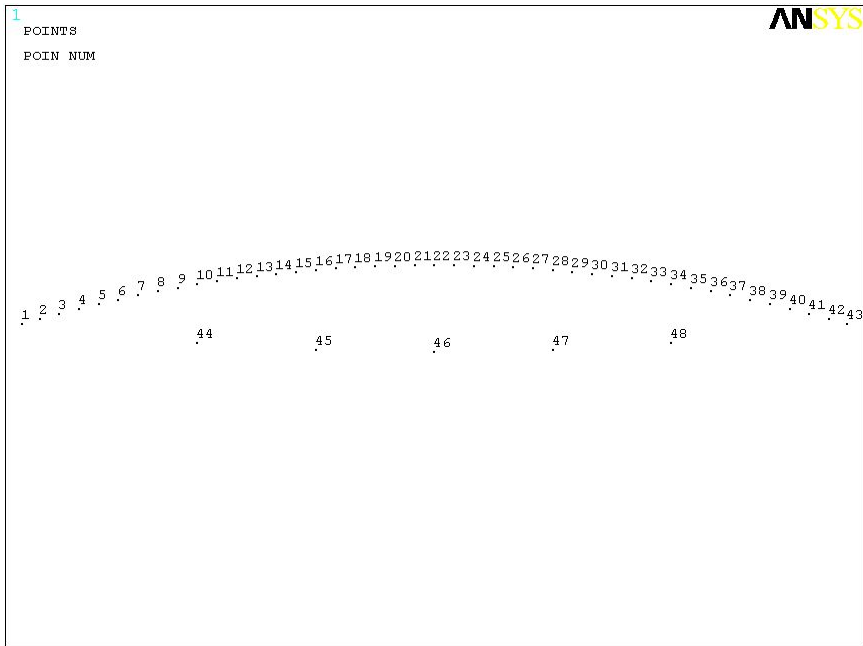


图 15.24 Keypoints 关键点编号

step 3 建立张弦梁模型。通过以下命令流建立拱梁单元:

```
* do, i, 1, 42
  L, i, i+1
* enddo
```

通过以下命令流建立撑杆单元:

```
L, 10, 44
L, 16, 45
L, 22, 46
L, 28, 47
L, 34, 48
```

通过以下命令流建立索单元:

```
L, 1, 44
* do, i, 44, 47
  L, i, i+1
* enddo
L, 48, 43
```

输入以上命令流之后, 显示 **Line** 单元, 出现如图 15.25 所示的几何模型。

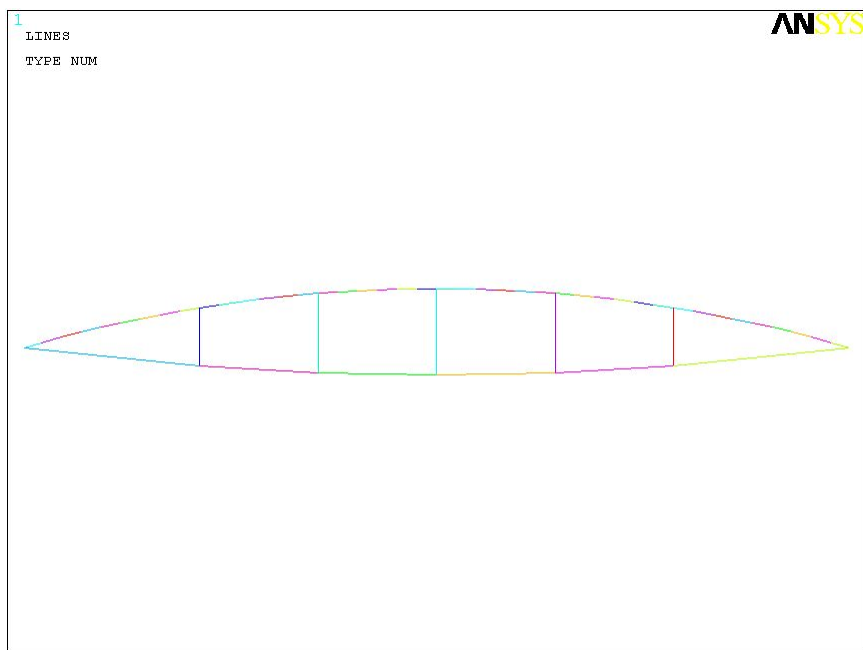


图 15.25 几何模型图



读者也可以自行手动一个一个地连接关键点，建立结构模型。

15.2.2.4 划分网格

- step 1** 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Meshing Attributes→Default Attrbts 命令，弹出 Meshing Attributes 对话框，所有选项均保持默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。
- step 2** 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 命令，弹出 Element Size on Picked Lines 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口中选择拱梁，单击 Apply 按钮，弹出如图 15.26 所示的对话框，在 No. of element divisions 栏中输入 2，单击 OK 按钮退出该对话框。
- step 3** 重复步骤 2，在 Meshing Attributes 对话框中，前 3 个选项均选择 2，如图 15.27 所示；在如图 15.26 所示的对话框中，在 No. of element divisions 栏中输入 1，划分撑杆单元网格。再次重复步骤 2，在 Meshing Attributes 对话框中，前 3 个选项均选择 3；在如图 15.26 所示的对话框中，在 No. of element divisions 栏中输入 1，划分索单元网格。划分完之后，显示如图 15.28 所示的结果。

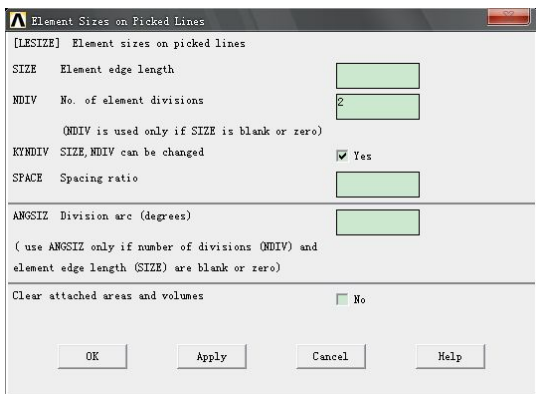


图 15.26 Element Sizes on Picked Lines 对话框

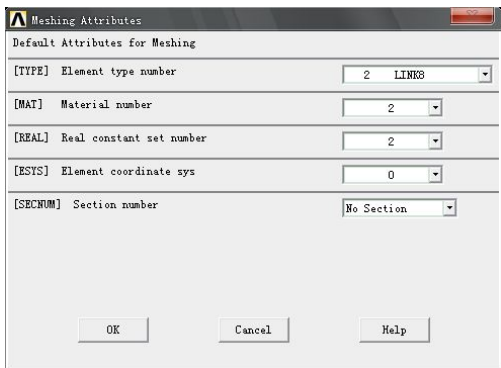


图 15.27 Meshing Attributes 对话框

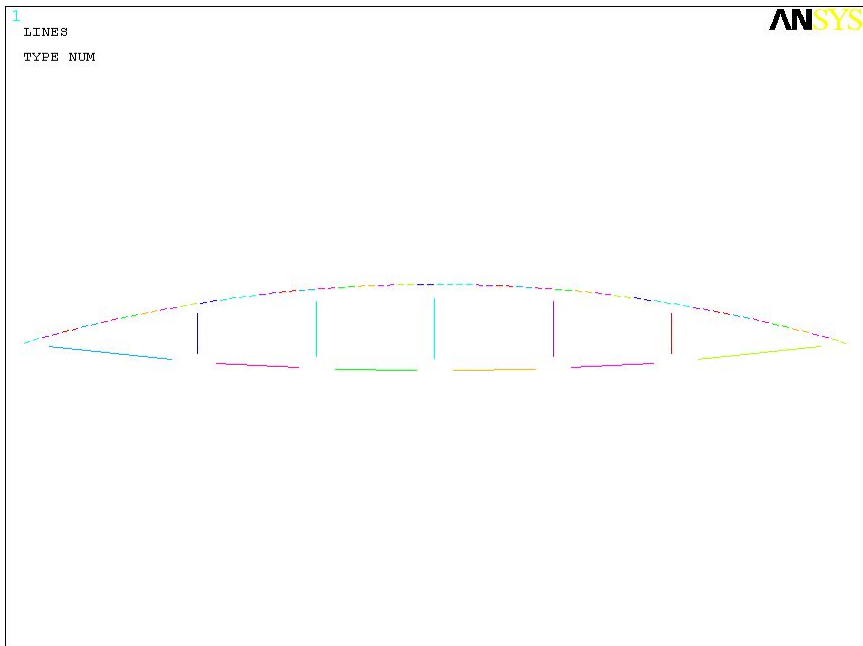


图 15.28 网格划分结果

step 4

选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines 命令，拾取所有的线，单击 OK 按钮退出。选择 Utility Menu→Plot→Elements 命令，选择 Utility Menu→PlotCtrls→Size and Shape 命令，弹出 Size and Shape 对话框，在 Display of element 栏中选中 On 复选框，如图 15.29 所示，其他选项保持默认设置，单击 OK 按钮退出该对话框。此时，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.30 所示的张弦梁结构单元划分结果，即有限元模型。

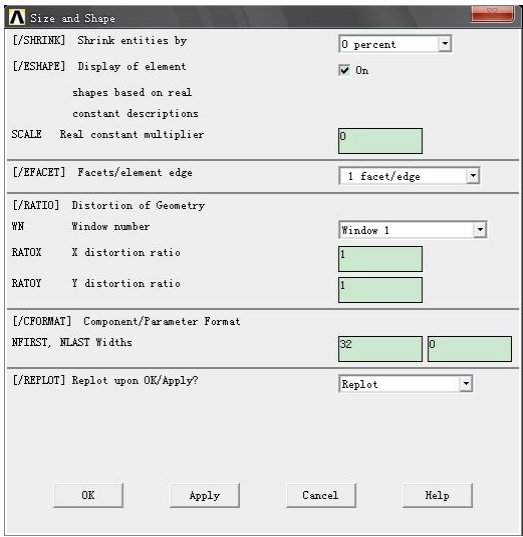


图 15.29 Size and Shape 对话框

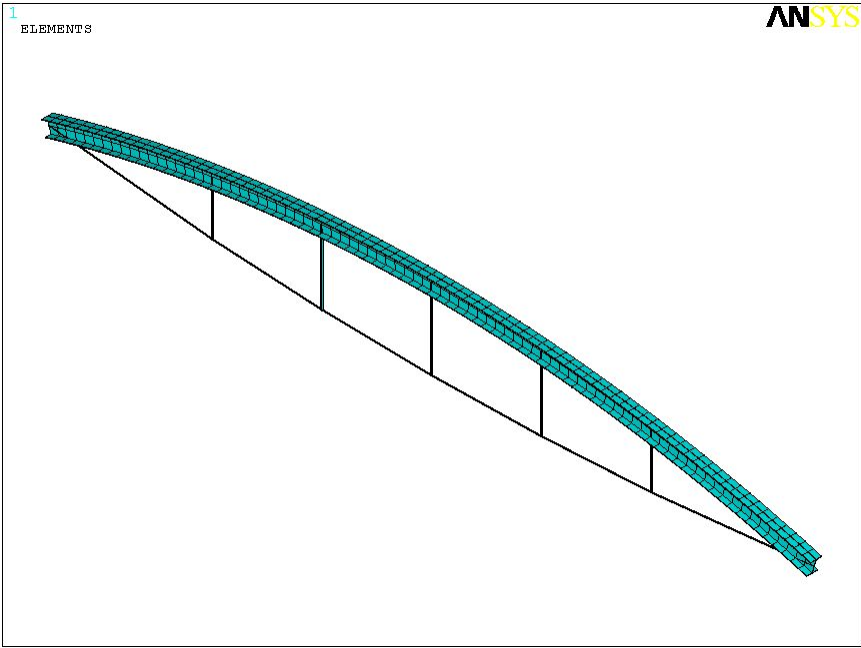


图 15.30 张弦梁结构单元划分结果

15.2.2.5 加载求解

- step 1

选择 Utility Menu→PlotCtrls→View Setting→Viewing Direction 命令，弹出 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中分别输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。
- step 2

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Keypoints 命令，弹出 Apply U,ROT on Keypoints 拾取菜单，用鼠标拾取左边支座，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX, UY, UZ 选项，如图 15.31 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。重复执行



上述过程，在拱梁右边支座关键点上设置约束 UY, UZ，在拱梁关键点上设置侧向约束 UZ，之后会出现如图 15.32 所示的约束示意图。

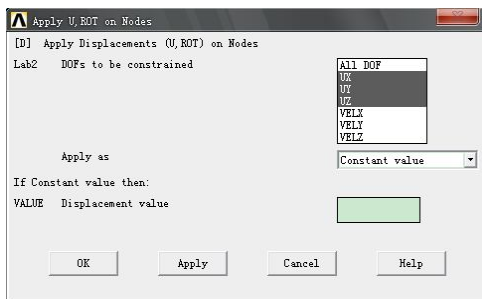


图 15.31 Apply U, ROT on Nodes 对话框

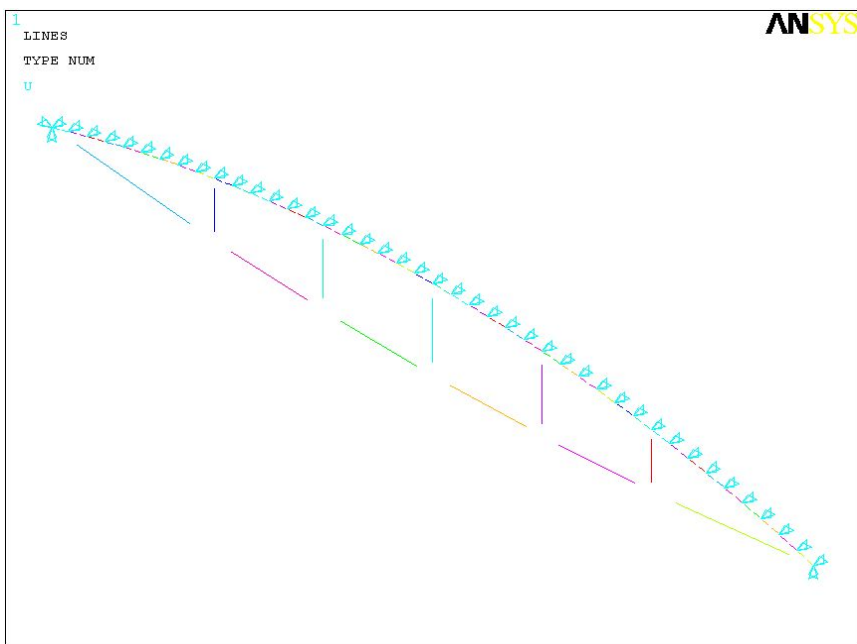


图 15.32 对模型施加约束后的结果



限制拱梁侧向约束是为了保证结构在面内受力，不发生侧向失稳。

step 3

选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Keypoint 命令，弹出 Apply F/M on KPs 拾取菜单，选择 44、45、46、47、48 关键点，单击 Apply 按钮，弹出 Apply F/M on KPs 对话框，在 Direction of force/mom 下拉列表框中选择 FY 选项，在 Force Value 栏中输入 -330，如图 15.33 所示，单击 OK 按钮退出 Apply F/M on KPs 对话框。



该操作为考虑索、撑杆节点球重量 (330N)，于相应节点上施加集中载荷。

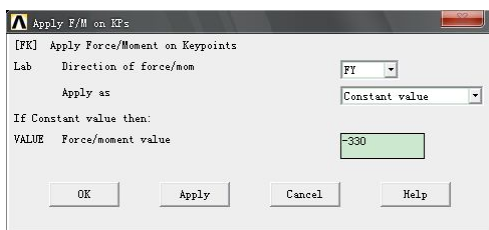


图 15.33 Apply F/M on KPs 对话框

step 4

选择 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Inertia → Gravity → Global 命令，弹出 Apply Acceleration 对话框，在 ACELY 栏中输入 9.8，其余选项采用默认设置，如图 15.34 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

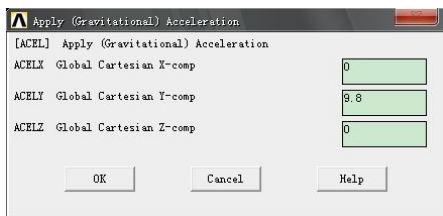


图 15.34 Apply Acceleration 对话框



该操作为考虑结构自重，通过设置重力加速度值，由程序自动计算结构材料自重。

step 5

选择 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Temperature → On Elements 命令，弹出 Apply TEMP on Elems 拾取菜单，如图 15.35 所示，选择索单元，单击 Apply 按钮，弹出 Apply TEMP on Elems 对话框，在 Temperature at location N 输入栏中输入 -45，其余选项采用默认设置，如图 15.36 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



图 15.35 Apply TEMP on Elems 拾取菜单

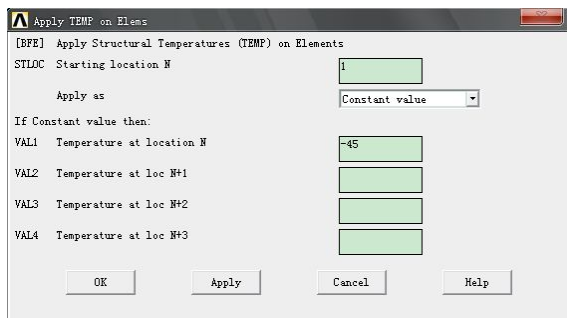


图 15.36 Apply TEMP on Elems 对话框

step 6

在拱梁上施加屋面恒载荷。通过下面的命令流，将屋面恒载荷转化为集中载荷，施加于拱梁上的关键点上。


```

* do, i, 1, 43
    FK, i, FY, -1200          ! 0.8kN/m2*3m*0.5m=1200N
* enddo

```

step 7

选择 Utility Menu→Plot→Elements 命令,选择 Utility Menu→PlotCtrls→Symbols 命令,弹出 Symbols 对话框,在 Boundary condition symbol 栏中选中 All Applied BCs 单选按钮,其他选项保持默认设置,如图 15.37 所示,单击 OK 按钮退出该对话框。选择 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Size and Shape 命令,弹出 Size and Shape 对话框,如图 15.38 所示,在 Display of element 栏中选中复选框,使其状态由 Off 变成 On,其他选项保持默认设置,单击 OK 按钮退出该对话框。此时,显示如图 15.39 所示的结构加载结果。

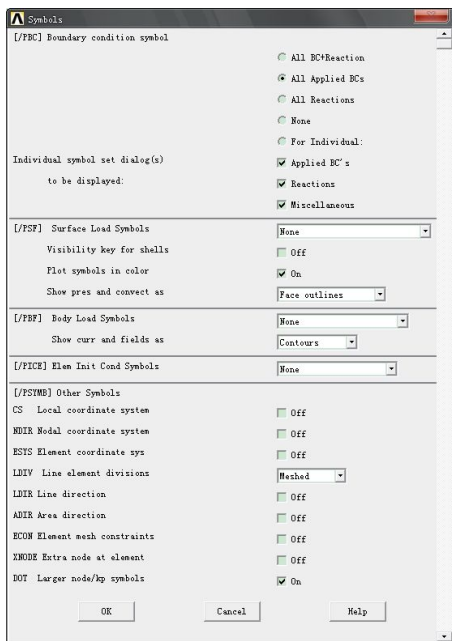


图 15.37 Symbols 对话框

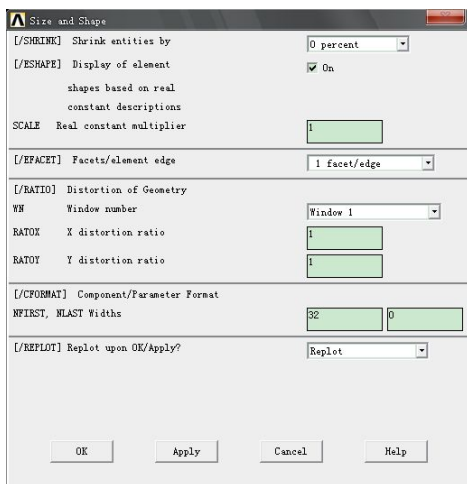


图 15.38 Size and Shape 对话框

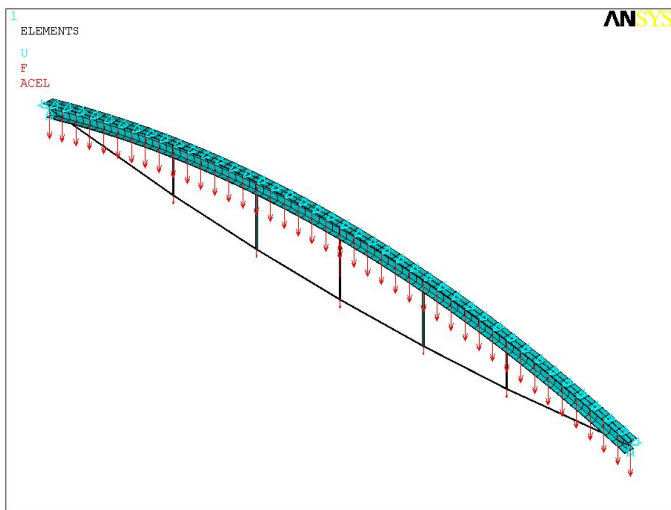


图 15.39 结构加载结果



step 8

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol's Controls 命令, 弹出 Solution Controls 对话框, 在 Basic 选项卡下的 Analysis Options 下拉列表框中选择大变形选项, 在 Number of substeps 输入栏中输入 10, 如图 15.40 所示, 其余选项采用默认设置, 单击 OK 按钮关闭该对话框。



图 15.40 Solution Controls 对话框

step 9

选择 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 命令, 弹出 New Analysis 对话框, 选择分析类型为 Static, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 10

选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令, 弹出 Solve Current Load Step 对话框, 单击 OK 按钮, ANSYS 开始求解计算。

step 11

求解结束时, 弹出 Note 对话框, 单击 Close 按钮关闭该对话框。此时屏幕上显示如图 15.41 所示的迭代计算结果。

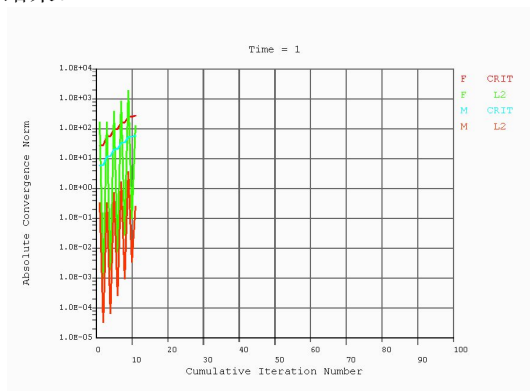


图 15.41 迭代计算结果

step 12

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令, 保存上述操作过程。

15.2.2.6 查看求解结果

step 1

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令, 弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框, 在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项, 其余选项采用默认设



置, 单击 OK 按钮, ANSYS 显示窗口将显示如图 15.42 所示的位移场分布等值线图。

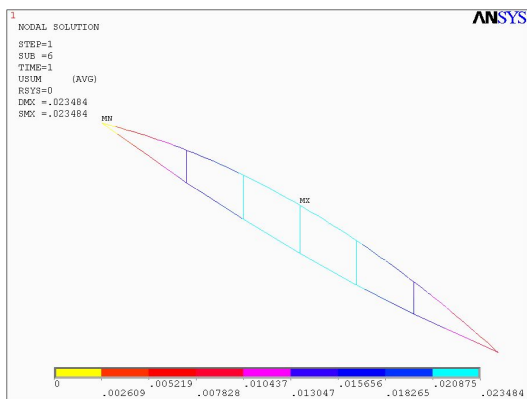


图 15.42 位移场分布等值线图

step 2

选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table 命令, 弹出 Define Element Table 对话框, 单击 Add 按钮, 弹出 Define Additional Element Table Items 对话框, 在 Item,Comp Results data item 栏中, 选择 By sequence num 选项, 选择 SMISC 选项, 在下面输入栏中的“SMISC,”后面输入 2, 其余选项采用默认设置, 如图 15.43 所示, 单击 OK 按钮退出该对话框。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令, 弹出 Plot Line-Element Results 对话框, 在 LabI 和 LabJ 栏中均选择 SMISC2 选项, 单击 OK 按钮退出该对话框, 如图 15.44 所示。此时, ANSYS 显示窗口将显示如图 15.45 所示的拱梁弯矩图。

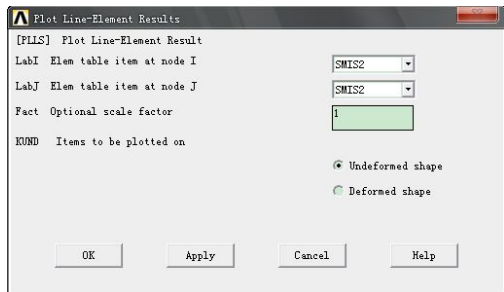
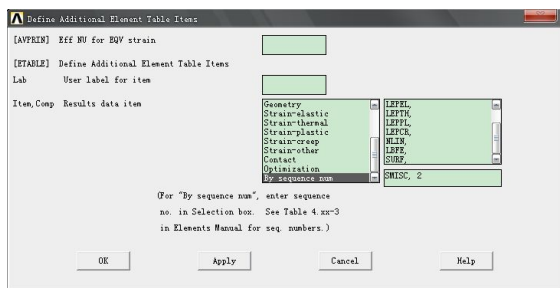


图 15.43 Define Additional Element Table Items 对话框

图 15.44 Plot Line-Element Results 对话框

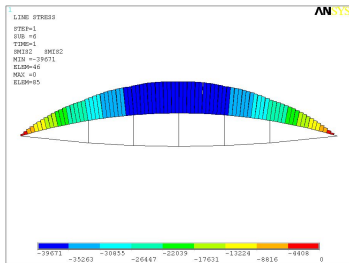


图 15.45 拱梁弯矩图

step 3

重复执行步骤 2 的操作, 弹出 Define Additional Element Table Items 对话框后, 在 Item,Comp Results data item 栏中, 选择 By sequence num 选项, 选择 SMISC 选项, 在下面输入栏中的“SMISC,”后面输入 5, 其余选项采用默认设置, 单击 OK 按钮退出该对话框。

框。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令，弹出 Plot Line-Element Results 对话框，在 LabI 和 LabJ 栏中均选择 SMISC5 选项，单击 OK 按钮退出该对话框。此时，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.46 所示的拱梁剪力图。

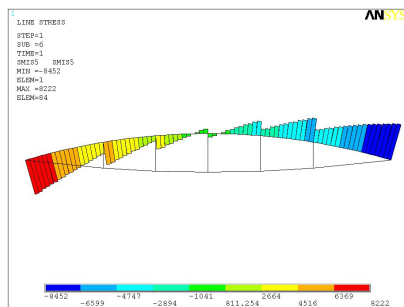


图 15.46 拱梁剪力图

step 4

重复执行步骤 2 的操作，弹出 Define Additional Element Table Items 对话框后，在 Item,Comp Results data item 栏中，选择 By sequence num 选项，选择 SMISC 选项，在下面输入栏中的“SMISC,”后面输入 1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮退出该对话框。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令，弹出 Plot Line-Element Results 对话框，在 LabI 和 LabJ 栏中均选择 SMISC1 选项，单击 OK 按钮退出该对话框。此时，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.47 所示的结构轴力图。

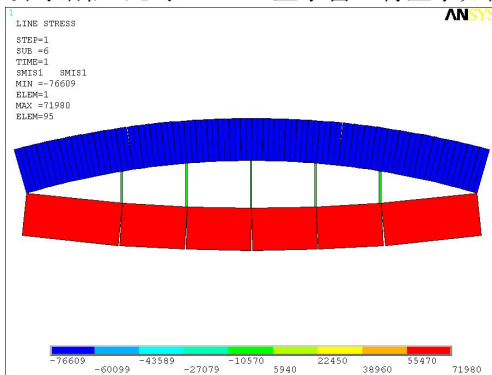


图 15.47 结构轴力图

step 5

重复执行步骤 2 的操作，弹出 Define Additional Element Table Items 对话框后，在 Item,Comp Results data item 栏中，选择 By sequence num 选项，选择 SMISC 选项，在下面输入栏中的“SMISC,”后面分别输入 31、34，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮退出该对话框。选择 Main Menu→General Postproc→Element Table→Add Items 命令，弹出 Add Element Table Items 对话框，在 LabR 输入栏中填入变量标签 SDSB，在 Lab1、Lab2 下拉列表框中分别选择 SMIS 31、SMIS 34 选项，其余选项采用默认设置，如图 15.48 所示，单击 OK 按钮退出该对话框。选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Line Elem Res 命令，弹出 Plot Line-Element Results 对话框，在 LabI 和 LabJ 栏中均选择 SDSB 选项，如图 15.49 所示，单击 OK 按钮退出该对话框。此时，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.50 所示的拱梁总应力图（轴向应力+弯曲应力）。

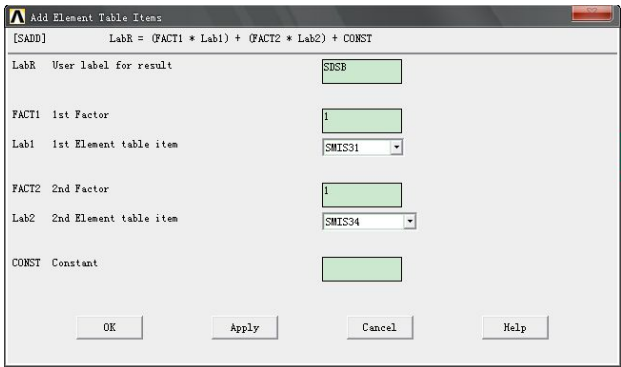


图 15.48 Add Element Table Items 对话框

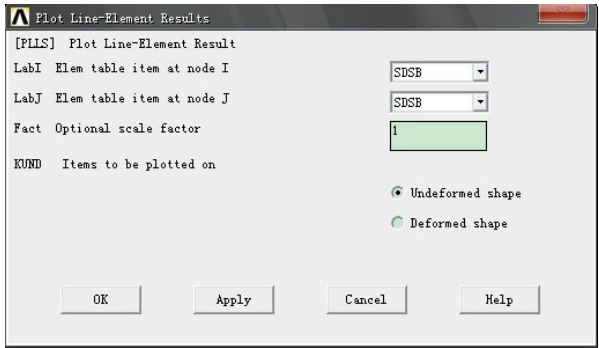


图 15.49 Plot Line-Element Results 对话框

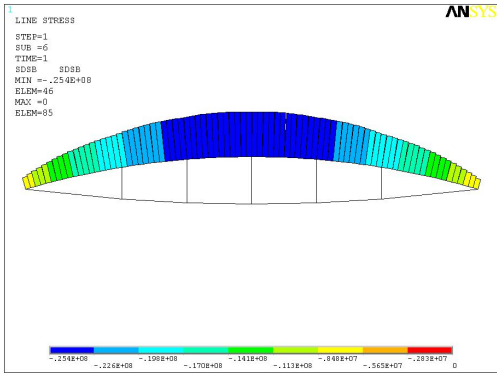


图 15.50 拱梁总应力图

step 6 选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

15.2.3 命令流

```
/PREP 7                                ! 进入前处理
K, 1, -10.450, .000, .000,             ! 创建关键点，拱梁左端点
K, 2, -10.000, .129, .000,
K, 3, -9.500, .265, .000,
K, 4, -9.000, .393, .000,
K, 5, -8.500, .515, .000,
K, 6, -8.000, .628, .000,
```

```
K, 7, -7.500, .735, .000,
K, 8, -7.000, .835, .000,
K, 9, -6.500, .927, .000,
K, 10, -6.000, 1.012, .000, ! 上弦梁节点, 撑杆位置
K, 11, -5.500, 1.091, .000,
K, 12, -5.000, 1.162, .000,
K, 15, -4.500, 1.227, .000,
K, 14, -4.000, 1.284, .000,
K, 15, -3.500, 1.335, .000,
K, 16, -3.000, 1.379, .000, ! 上弦梁节点, 撑杆位置
K, 17, -2.500, 1.416, .000,
K, 18, -2.000, 1.446, .000,
K, 19, -1.500, 1.470, .000,
K, 20, -1.000, 1.487, .000,
K, 21, -.500, 1.497, .000,
K, 22, .000, 1.500, .000, ! 上弦梁节点, 撑杆位置
K, 23, .500, 1.497, .000,
K, 24, 1.000, 1.487, .000,
K, 25, 1.500, 1.470, .000,
K, 26, 2.000, 1.446, .000,
K, 27, 2.500, 1.416, .000,
K, 28, 3.000, 1.379, .000, ! 上弦梁节点, 撑杆位置
K, 29, 3.500, 1.335, .000,
K, 30, 4.000, 1.284, .000,
K, 31, 4.500, 1.227, .000,
K, 32, 5.000, 1.162, .000,
K, 33, 5.500, 1.091, .000,
K, 34, 6.000, 1.012, .000, ! 上弦梁节点, 撑杆位置
K, 35, 6.500, .927, .000,
K, 36, 7.000, .835, .000,
K, 37, 7.500, .735, .000,
K, 38, 8.000, .628, .000,
K, 39, 8.500, .515, .000,
K, 40, 9.000, .393, .000,
K, 41, 9.500, .265, .000,
K, 42, 10.000, .129, .000,
K, 43, 10.450, .000, .000, ! 拱梁右端点
K, 44, -6.000, -.470, .000, ! 下弦索节点, 撑杆位置
K, 45, -3.000, -.643, .000, ! 下弦索节点, 撑杆位置
K, 46, .000, -.700, .000, ! 下弦索节点, 撑杆位置
K, 47, 3.000, -.643, .000, ! 下弦索节点, 撑杆位置
K, 48, 6.000, -.470, .000, ! 下弦索节点, 撑杆位置

! 连线, 创建线, 分为梁、索和撑杆, 同时分组
* do, i, 1, 42
  LSTR, i, i+1 ! 梁连线
* enddo
CM, LIANG, LINE ! 线分组, 定义为梁 LIANG
ALLSEL, ALL ! select all

LSTR, 10, 44 ! 撑杆连线
```

```

LSTR,      16,      45      ! 撑杆连线
LSTR,      22,      46      ! 撑杆连线
LSTR,      28,      47      ! 撑杆连线
LSTR,      34,      48      ! 撑杆连线
CMSEL,U,LIANG      ! 不选梁连线
CM, CHENGGAN,LINE      ! 线分组, 定义为撑杆 CHENGGAN
ALLSEL,ALL      ! select all
LSTR,      1,      44      ! 索连线, 左端索
* do, i, 44, 47
    LSTR, i, i+1      ! 索连线, 中间索
* enddo
LSTR,      48,      43      ! 索连线, 右端索
    CMSEL,U,LIANG      ! 不选梁连线
CMSEL,U,CHENGGAN      ! 不选撑杆连线
CM, SUO,LINE      ! 线分组, 定义为索 SUO
ALLSEL,ALL      ! select all

! 定义单元类型, 截面面积
ET, 1, BEAM188, , , 2, 2, , ,      ! 梁, 二次插值函数, 考虑横向剪力
ET, 2, LINK8      ! 撑杆
ET, 3, LINK10      ! 索
R,1, , ,      ! 梁
SECTYPE, 1, BEAM, I, , 0      ! 梁
SECOFFSET, CENT      ! 梁
SECDATA,0.3,0.3,0.4,0.016,0.016,0.01,0,0,0,0      ! 梁截面, 工 300*400*16*10
R,2,9.048e-4, ,      ! 撑杆截面 |76*4 A=855e-4|
R,3,373e-6,0,      ! 索截面 |5*19 A=373e-6|

!初始应变 0.0005 刚好抵消重力作用!
! 钢材料常数
UIMP,1,EX, , , 2e11,      ! 梁弹性模量
UIMP,1,NUXY, , , 0.3,      ! 梁泊松比
UIMP,1,ALPX, , , 1.1e-5,      ! 梁热膨胀系数
UIMP,1,DENS, , , 7840,      ! 梁密度
UIMP,2,EX, , , 2e11,      ! 撑杆弹性模量
UIMP,2,NUXY, , , 0.3,      ! 撑杆泊松比
UIMP,2,ALPX, , , 1.1e-5,      ! 撑杆热膨胀系数
UIMP,2,DENS, , , 7840,      ! 撑杆密度
UIMP,3,EX, , , 1.9e11,      ! 索弹性模量
UIMP,3,NUXY, , , 0.3,      ! 索泊松比
UIMP,3,ALPX, , , 1e-5,      ! 索热膨胀系数
UIMP,3,DENS, , , 7300,      ! 索密度
TREF,0      ! 定义参考温度

! 划分单元
K, 100, 0.0000, 5.0000, 0.0000,      ! 方向点
CMSEL,S,LIANG      ! 选择梁
LATT,1,1,1, , , 100, ,1      ! 设置属性, 拾取方向点
LESIZE,ALL, , , 2, ,1, , ,1,      ! 每个梁分 2 份
LMESH,ALL      ! 划分网格
CMSEL,S,CHENGGAN      ! 选择撑杆
LATT,2,2,2, , , ,      ! 设置属性

```



```

LESIZE,ALL, , ,1, ,1, , ,1,
LMESH,ALL
CMSEL,S,SUO
LATT,3,3,3, , , ,
LESIZE,ALL, , ,1, ,1, , ,1,
LMESH,ALL
! 施加约束
ALLSEL,ALL
KSEL,S,KP, ,1
DK,ALL, , , ,0,UX,UY,UZ, , , ,
ALLSEL,ALL
KSEL,S,KP, ,43
DK,ALL, , , ,0, ,UY,UZ, , , ,
ALLSEL,ALL
CMSEL,S,LIANG
KSL,L,S
KSEL,U,KP, ,1
KSEL,U,KP, ,43
DK,ALL, , , ,0, , ,UZ, , , ,
ALLSEL,ALL

! 求解, 第一个工况
/solu
time,1
FK, 44, FY, -330
FK, 45, FY, -330
FK, 46, FY, -330
FK, 47, FY, -330
FK, 48, FY, -330
ACEL,0,9.8,0,
NLGEOM,on
EMATWRITE,YES
OUTRES,ALL,ALL
RESCONTRL,DEFINE,all,all,1
solve
FINISH

! 求解, 第二个工况
/solu
time,2
CMSEL,S,SUO
ESLL,S
BFE,ALL,TEMP,1,-45
ALLSEL,ALL
NLGEOM,on
NSUBST,10
OUTRES,ALL,ALL
RESCONTRL,DEFINE,all,last,0
solve
FINISH

```

! 每个撑杆分 1 份

! 划分网格

! 选择索

! 设置属性

! 每段索分 1 份

! 划分网格

! select all

! 选择左端点, 根据模型不同修改

! 固定铰支座

! select all

! 选择右端点, 根据模型不同修改

! 竖向滑移支座

! select all

! 选择梁

! 选择梁上的关键点

! 不选择左端点

! 不选择右端点

! 约束侧向约束

! select all

! 第一步分析, 重力载荷作用

! 球自重 33kg

! 加速度标准值

! 考虑大变形

! 写结果文件

! 输出所有结果

! 第二步分析, 模拟降温施加预应力, 抵消重力作用

! 选择索 SUO

! 选择索上的单元

! 降温施加预应力, 以抵消重力变形

! select all

! 考虑大变形

! 10 个子步

! 输出所有结果

! 只写最后一步




```

! 求解, 第三个工况
/solu
time, 3
* do, i, 1, 43
    FK, i, FY, -1200
* enddo

NLGEOM, on
NSUBST, 10
OUTRES, ALL, ALL
RESCONTRL, DEFINE, all, last, 0
solve
FINISH

/POST1
/DSCALE, 1, 0
PLNSOL, U, SUM, 1, 1, ,
/UI, COPY, SAVE, BMP, GRAPH, MONO, REVERSE, LANDSCAPE, no, 100

ETABLE, MFORX, SMISC, 1
/UI, COPY, SAVE, BMP, GRAPH, MONO, REVERSE, LANDSCAPE, no, 100
PLLS, MFORX, MFORX, 1, 0
/UI, COPY, SAVE, BMP, GRAPH, MONO, REVERSE, LANDSCAPE, no, 100
! PLETAB, SAXL, ,
! PLETAB, MFORX, ,

ETABLE, SDIR_I, SMISC, 31
ETABLE, SDIR_J, SMISC, 36
ETABLE, MY_I, SMISC, 2
ETABLE, MY_J, SMISC, 15
ETABLE, SFZ_I, SMISC, 5
ETABLE, SFZ_J, SMISC, 18
ETABLE, FX_I, SMISC, 1
ETABLE, FX_J, SMISC, 14
ETABLE, SBZT_I, SMISC, 34
ETABLE, SBZT_J, SMISC, 39
SADD, SD_SB_I, SDIR_I, SBZT_I, 1, 1, ! 定义梁总应力 (轴向应力+弯曲应力) table, i 节点
SADD, SD_SB_J, SDIR_J, SBZT_J, 1, 1, ! 定义梁总应力 (轴向应力+弯曲应力) table, j 节点
ALLSEL, ALL
PLLS, SDIR_I, SDIR_J, 1, 0
/UI, COPY, SAVE, BMP, GRAPH, MONO, REVERSE, LANDSCAPE, no, 100
PLLS, MY_I, MY_J, 1, 0
/UI, COPY, SAVE, BMP, GRAPH, MONO, REVERSE, LANDSCAPE, no, 100
PLLS, SFZ_I, SFZ_J, 1, 0
/UI, COPY, SAVE, BMP, GRAPH, MONO, REVERSE, LANDSCAPE, no, 100
PLLS, FX_I, FX_J, 1, 0
/UI, COPY, SAVE, BMP, GRAPH, MONO, REVERSE, LANDSCAPE, no, 100
PLLS, SD_SB_I, SD_SB_J, 1, 0
/UI, COPY, SAVE, BMP, GRAPH, MONO, REVERSE, LANDSCAPE, no, 100

```

! 第三步分析, 恒载荷

! 0.8kN/m²*3m*0.5m=1200N, 节点载荷

! 考虑大变形

! 10 个子步

! 输出所有结果

! 只写最后一步

! 后处理

! 自动比例

! 图形显示挠度

! 定义索力及撑杆力 table, 二者共用

! 图形显示索力 MFORX 及撑杆力 MFORX 结果

! 图形显示索应力 SAXL 及撑杆应力 SAXL 结果

! 图形显示索力 MFORX 及撑杆力 MFORX 结果

! 定义梁轴向应力 table, i 节点

! 定义梁轴向应力 table, j 节点

! 定义梁弯矩 table, i 节点

! 定义梁弯矩 table, j 节点

! 定义梁剪力 table, i 节点

! 定义梁剪力 table, j 节点

! 定义梁轴向力 table, i 节点

! 定义梁轴向力 table, j 节点

! 定义梁弯曲正应力 table, i 节点

! 定义梁弯曲正应力 table, j 节点

! select all

! 图形显示梁轴向应力结果

! 图形显示梁弯矩结果

! 图形显示梁剪力结果

! 图形显示梁轴向力结果

! 图形显示梁总应力结果

```
PRRSOL, , ! 列表显示结果
PRNSOL,U,COMP ! 列表显示结果
PRETAB, EPELAXL, SAXL, MFORX, ! 列表显示结果
PRETAB, SDIR_I, SDIR_J, FX_I, FX_J, ! 列表显示结果
PRETAB, SBZT_I, SBZT_J, MY_I, MY_J, ! 列表显示结果
PRETAB, SD_SB_I, SD_SB_J, SFZ_I, SFZ_J, ! 列表显示结果

FINISH
```

15.3 实例详解 3：空腹梁楼盖组合结构模态分析

混凝土空腹梁楼盖组合结构是一种新型大跨楼盖结构，可实现大跨度（ $18\text{m} \leq L \leq 42\text{m}$ ）无柱、多层数（ $2 \leq n \leq 4$ ）的结构方案，在国内最早由贵州大学马克俭院士提出应用，在近三十年的大量实际工程应用中，空腹梁楼盖组合结构形式不断得到完善，为国家节约了大量的土地资源。如图 15.51 所示即为某大学体育场馆的空腹梁楼盖组合结构。



图 15.51 某大学体育场馆空腹梁楼盖组合结构

15.3.1 问题描述与分析

混凝土空腹梁楼盖组合结构为双层十字交叉梁，中间设短立柱，在上层十字交叉梁铺设楼板。本实例中所分析的结构尺寸如下：短向跨度 24m，长向跨度 42m，十字交叉网格尺寸为 2m×2m，楼盖结构高 1.2m，梁截面尺寸为 0.4m×0.25m，短柱截面尺寸为 0.4m×0.4m，混凝土标号为 C30。材料属性：混凝土弹性模量为 $3.0 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ，密度为 2500kg/m^3 ，泊松比为 0.2。试进行该结构的模态分析。

采用坐标节点输入法的建模方法建立该实例的三维模型，选择 BEAM188 单元模拟十字交叉梁及短立柱。

15.3.2 求解过程

15.3.2.1 定义工作目录及文件名

step 1

启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 15\15-3，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter15-3。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

15.3.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 中的 3D 2 node 188 单元，如图 15.52 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Sections→Beam→Common Sections 命令，弹出 Beam Tool 对话框，在 Sub-Type 栏中选择“口”字形截面，并在 B、H 栏中分别输入截面参数 0.4、0.25，如图 15.53 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

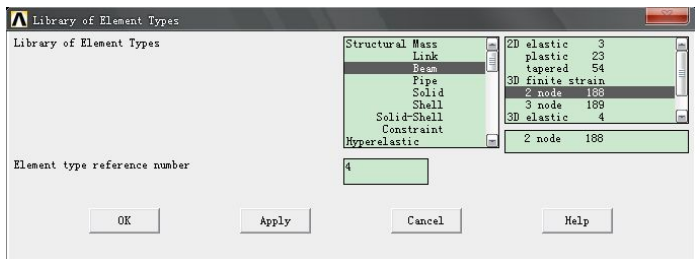


图 15.52 Library of Element Types 对话框

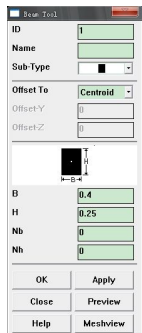


图 15.53 Beam Tool 对话框

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 3.0e10，在 PRXY 输入栏中输入 0.2，如图 15.54 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Density 选项，在 Density for Material Number 1 对话框的 DENS 栏中输入 2500，如图 15.55 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

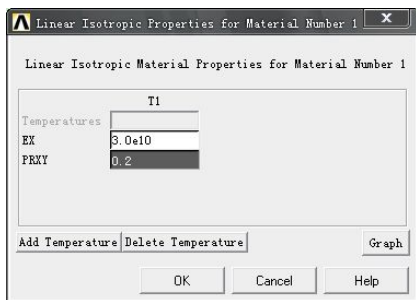


图 15.54 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

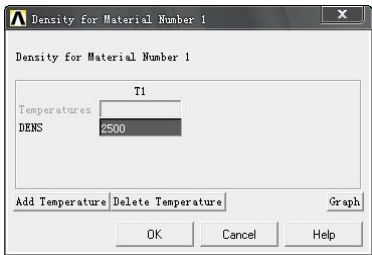


图 15.55 Density for Material Number 1 对话框

step 2 选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

15.3.2.3 创建楼盖模型

step 1 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Keypoints**→**In Active CS** 命令，弹出 **Create Keypoints in Active Coordinate System** 对话框，在 X,Y,Z Location in active CS 栏中输入 1 号关键点的坐标值 0、0、0，如图 15.56 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

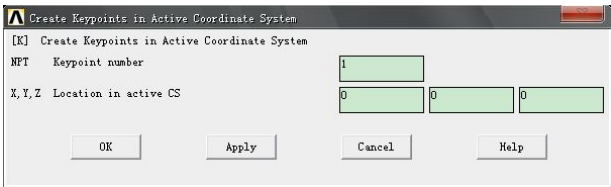


图 15.56 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

step 2 选择 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Copy**→**Keypoints** 命令，弹出 **Cope Keypoints** 拾取菜单，选择 1 号关键点，单击 **Apply** 按钮，弹出 **Copy Keypoints** 对话框，在 **ITIME** 栏中输入 22，在 **DX** 栏中输入 2，如图 15.57 所示，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。



图 15.57 Copy Keypoints 拾取菜单及对话框

step 3 重复执行步骤 2，选择所有 22 个关键点，在 **Copy Keypoints** 对话框的 **ITIME** 栏中输入 15，在 **DY** 栏中输入 2，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering** 命令，弹出 **Plot Numbering Controls** 对话框，打开 **Keypoint Numbers** 选项，单击 **OK**

按钮退出，则显示如图 15.58 所示的关键点编号。

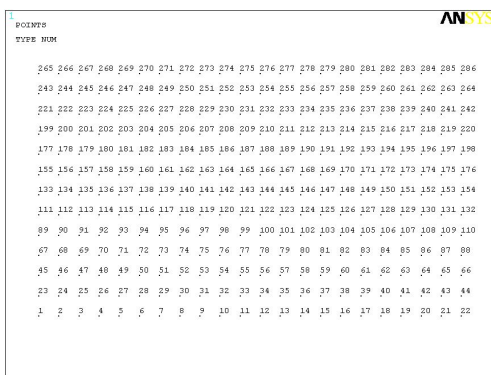


图 15.58 Keypoints 关键点编号

step 4

通过以下命令流可建立上层十字交叉梁。

```
K=0
*do, i, 1, 15
  *do, j, 1+k, 21+k
    L, j, j+1
  *enddo
  K=j+1
*enddo

m=0
*do, i, 1, 22
  k=0
  *do, j, 1, 12
    L, j+k+m, j+k+m+22
    k=21*j
  *enddo
  m=i
*enddo
```

通过以下命令流可建立下层十字交叉梁。

```
LGEN, 2, 1, 537, 1, , , 1.2, 0, ,
```

通过以下命令流可建立短立柱。

```
*do, i, 1, 286
  L, i, i+286
*enddo
```

step 5

选择 Utility Menu→Plot→Lines 命令，选择 Utility Menu→PlotCtrls→View Setting→Viewing Direction 命令，弹出 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中分别输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，如图 15.59 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。此时，ANSYS 显示窗口显示如图 15.60 所示的结果。

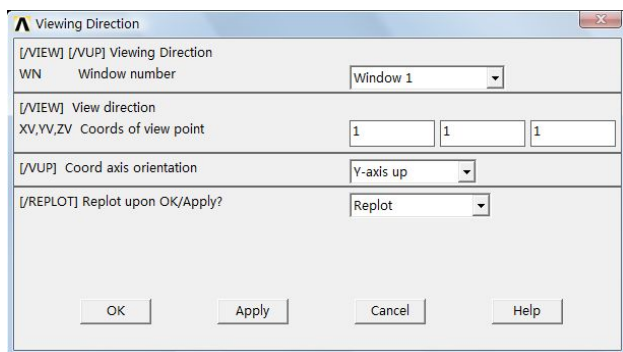


图 15.59 Viewing Direction 对话框

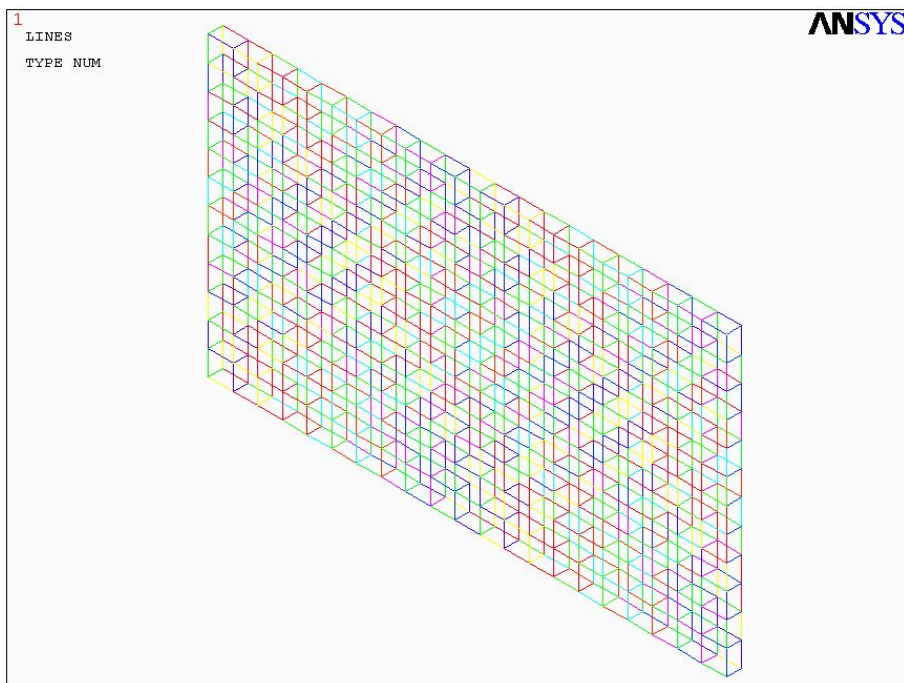


图 15.60 生成线后的结果

15.3.2.4 划分网格

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Meshing Attributes→ALL Lines 命令，弹出 Line Attributes 对话框，所有选项均保持默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→ALL Lines 命令，弹出 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 No. of element divisions 栏中输入 5，如图 15.61 所示，单击 OK 按钮退出该对话框。

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines 命令，弹出 Mesh Lines 对话框，单击 Pick All 按钮，单击 OK 按钮退出该对话框。

step 4 选择 Utility Menu→Plot→Lines 命令，选择 Utility Menu→PlotCtrls→View Setting→Viewing Direction 命令，弹出 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中分别输入 0.5、-0.5、0.8，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该

对话框。选择 **Utility Menu**→**Plot**→**Elements** 命令，选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Size and Shape** 命令，弹出 **Size and Shape** 对话框，选中 **Display of element** 栏中的复选框，如图 15.62 所示，其他选项保持默认设置，单击 **OK** 按钮退出该对话框。此时，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.63 所示的空腹梁楼盖组合结构的单元划分结果，即有限元模型。

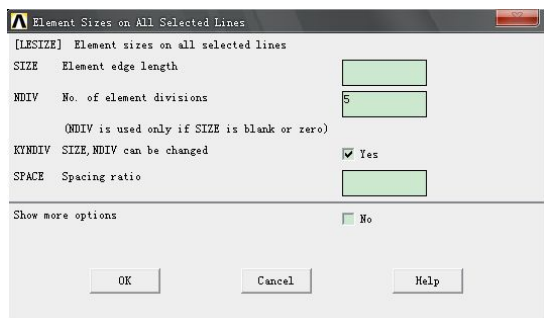


图 15.61 Element Sizes on All Selected Lines 对话框

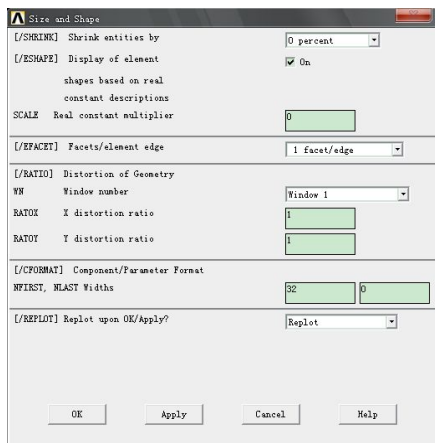


图 15.62 Size and Shape 对话框

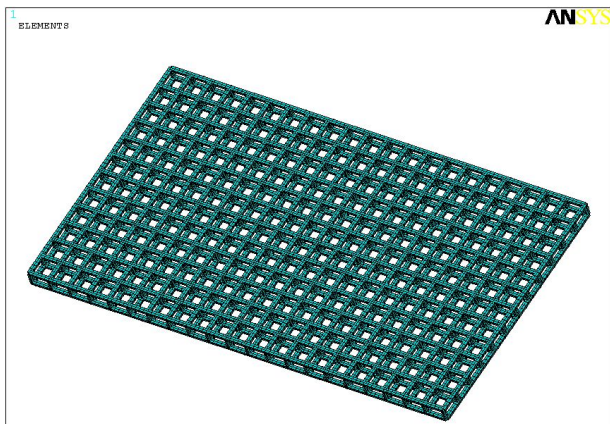


图 15.63 空腹梁楼盖组合结构的单元划分结果

step 5 选择 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 命令，保存上述操作过程。

15.3.2.5 加载求解

step 1 选择 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**View Setting**→**Viewing Direction** 命令，弹出 **Viewing Direction** 对话框，在 **XV,YV,ZV Coords of view point** 输入栏中分别输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 2 通过以下命令流施加结构约束。

```
*do, i, 1, 22, 1
  DK, i, , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 265, 286, 1
  DK, i, , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
```



```

*do, i, 287, 308, 1
  DK, i, , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 551, 572, 1
  DK, i, , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 23, 243, 22
  DK, i, , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 44, 264, 22
  DK, i, , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 309, 529, 22
  DK, i, , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 330, 550, 22
  DK, i, , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo

```

选择 **Utility Menu**→**Plot**→**Lines** 命令，此时，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.64 所示的空腹梁楼盖组合结构模型约束结果。

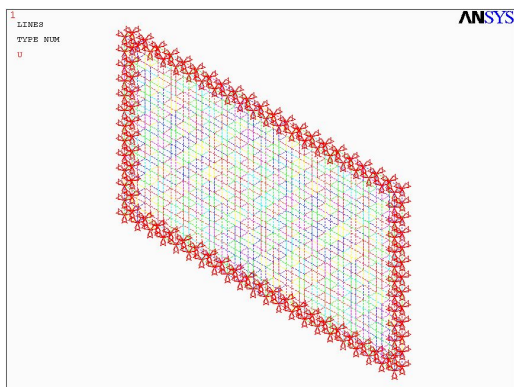


图 15.64 结构模型约束结果

step 3

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis** 命令，弹出 **New Analysis** 对话框，选择分析类型为 **Modal**，单击 **OK** 按钮关闭该对话框。

step 4

选择 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Analysis Options** 命令，弹出 **Modal Analysis** 对话框，在 **MODOPT** 栏中选择 **Block Lanczos** 单选按钮，在 **No. of modes to extract** 输入栏中输入 10，在 **No. of modes to expand** 输入栏中输入 10，其他选项采用默认设置，如图 15.65 所示，单击 **OK** 按钮，弹出 **Block Lanczos Method** 对话框，保持默认设置，如图 15.66 所示，单击 **OK** 按钮退出该对话框。

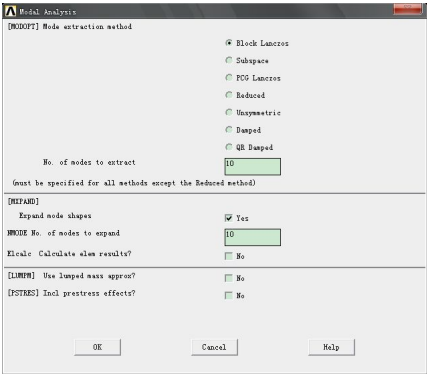


图 15.65 Modal Analysis 对话框

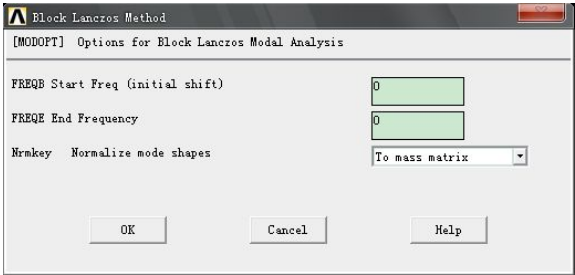


图 15.66 Block Lanczos Method 对话框

- step 5

选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。
- step 6

求解结束时，弹出 Note 对话框，单击 Close 按钮关闭该对话框。
- step 7

选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

15.3.2.6 查看求解结果

- step 1

选择 Main Menu→General Postproc→Results Summary 命令，显示频率计算结果文件，如图 15.67 所示，由图可知，该模型结构的第一阶固有频率为 4.5134Hz。

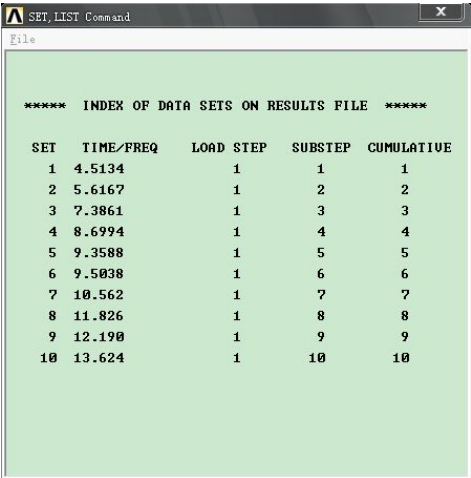


图 15.67 频率计算结果

step 2

选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→First Set 命令，选择 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Mode Shape 命令，弹出 Animate Mode Shape 对话框，在 No. of frames to create 输入栏中输入 10，在 Time delay 输入栏中输入 0.5，在 Display Type 栏中选择 DOF solution 选项，在其右边的栏中选择 Deformed Shape 选项，其余选项采用默认设置，如图 15.68 所示，单击 OK 按钮退出该对话框，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.69 所示的第一阶振型的动画效果。

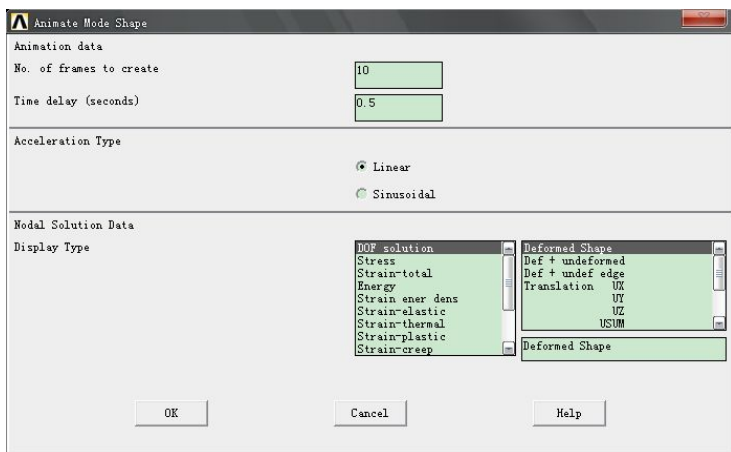


图 15.68 Animate Mode Shape 对话框

step 3

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，选择 Main Menu→General Postproc→Read Results→Next Step 命令，此时，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.70 所示的位移场分布等值线图。

step 4

选择 Utility Menu→File→Exit 命令，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选择 Save Everything 单选按钮，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS 程序。

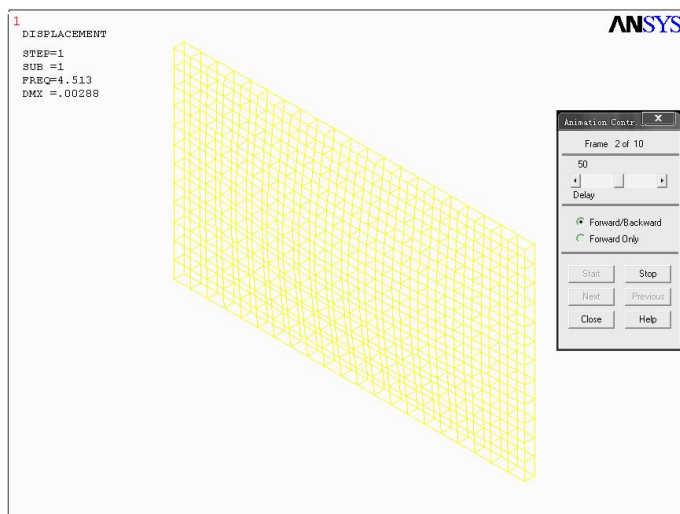


图 15.69 结构第一阶振型动画效果

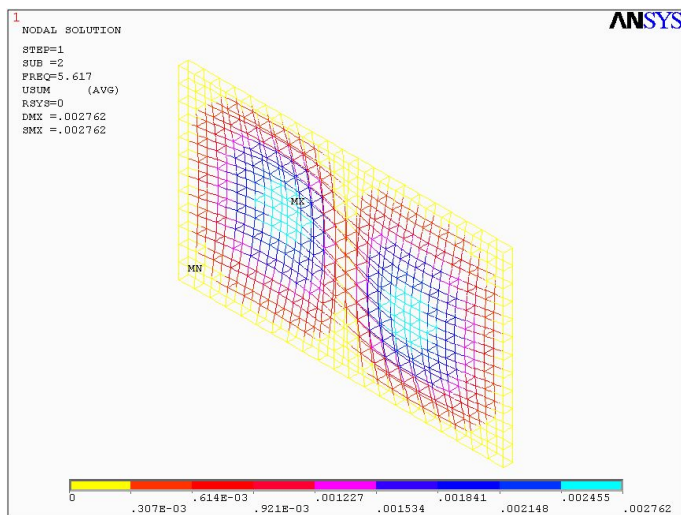


图 15.70 第二阶振型位移场分布等值线图

15.3.3 命令流

```

/prep7
!定义单元及材料属性
ET, 1, BEAM188, , , 2, 2, , ,
UIMP,1,EX, , , 3e10, ! 梁弹性模量
UIMP,1,NUXY, , , 0.2, ! 梁泊松比
UIMP,1,DENS, , , 2500, ! 梁密度
R,1, , ,
SECTYPE, 1, BEAM, RECT, , 0 ! 定义梁截面
SECOFFSET, CENT ! 指定单元节点在截面上的位置
SECDATA,0.4,0.25, ,

!建立模型
K,1,0,0,0 ! 建立第一个关键点
KGEN,22,1,22,1,2,,,,, ! 沿 X 轴方向复制关键点
KGEN,15,1,22,1,,2,,,,, ! 沿 Y 轴方向复制关键点
!创建上层十字交叉梁
K=0
*do, i, 1, 15
  *do, j, 1+k, 21+k
    L, j, j+1
  *enddo
  K=j+1
*enddo

m=0
*do, i, 1, 22
  k=0
  *do, j, 1, 12
    L, j+k+m, j+k+m+22
    k=21*j
  *enddo

```



```
m=i
*enddo

!创建下层十字交叉梁
LGEN, 2, 1, 537, 1, , , 1.2, 0, ,

!创建短立柱
*do, i, 1, 286
    L, i, i+286
*enddo

! 划分网格
LATT, 1, , 0, , , 1                                ! 设置属性
LESIZE, ALL, , , 5, , 1, , ,                       ! 每个梁分 5 份
LMESH, ALL                                           ! 划分网格

! 施加约束
*do, i, 1, 22, 1
    DK, i, , , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 265, 286, 1
    DK, i, , , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 287, 308, 1
    DK, i, , , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 551, 572, 1
    DK, i, , , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 23, 243, 22
    DK, i, , , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 44, 264, 22
    DK, i, , , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 309, 529, 22
    DK, i, , , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo
*do, i, 330, 550, 22
    DK, i, , , , , , UX, UY, UZ, , ,
*enddo

/SOLU                                !进入求解模块 SOLUTION
AnType, Modal                        !分析类型是模态分析
ModOpt, LANB, 10                    !模态分析选项: Block Lanczos 方法, 前 10 阶振型和频率
MPXAND, 10                          !展开前 10 阶振型
SOLVE                               !开始求解

/POST1                              !进入后处理模块 POST1
SET, 1, 1                           !读入第一阶频率和振型
PLDISP, 1                           !在图形窗口显示结构变形
```



```
ANMODE, 10, 0.5, 5 !用 10 帧每隔 0.5 秒一帧的动画显示振型, 循环 5 次
FINISH
```

15.4 实例详解 4: 悬链面薄膜结构找形分析

索膜结构是一种应用非常广泛的结构形式, 由于索膜在无应力情况下没有刚度, 不具有承载力和一定的形状, 所以必须施加适当的预应力来使其产生足够的刚度并确定形状。

其设计中主要涉及到 3 个关键环节: 找形、载荷分析和裁剪分析。

找形也叫形态分析, 指的是给定预应力分布以及控制点 (即约束点, 通常为实际的支座点) 坐标, 通过适当的方法确定该预应力分布下索膜结构的平衡形态。

找形是载荷分析和裁剪分析的基础, 是索膜设计的出发点, 也是一个难点, 需要找到给定预应力分布下的平衡形态, 因为预先并不知道该形态。在初设形态下, 预应力一般不能平衡, 需要通过适当的方法进行迭代计算, 来确定能够使预应力分布平衡的位移形态。本节将探讨这种计算方法, 并给出 ANSYS 解决方案以及相应的验证实例。

1. 单元类型

ANSYS 提供了 SHELL41、SHELL63、SHELL181 等壳单元。由于膜单元具有不抗弯、不抗压的特性, 故选用 SHELL41 单元是最符合实际的。但 SHELL41 单元不能直接赋予初应力, 而是通过降温的手段达到模拟施加预应力的目的。因此当运用 SHELL41 单元时, 势必要通过温度与预应力的换算公式来确定所施加的温度, 这部分内容在相关文献上已有不少介绍, 此处不再赘述。在这里我们不采用 SHELL41 单元, 而采用 SHELL181 单元来模拟膜布, 其优点有两点: SHELL181 单元可以直接指定预应力, 不用通过温度来进行模拟施加; 通过设置材料属性, 可将 SHELL181 单元保留很小的抗弯刚度, 这样有利于计算的稳定, 为载荷分析中可能出现的皱褶情况下的计算收敛提供帮助, 并有助于模拟出皱褶形状, 符合膜结构弯曲刚度不完全为 0 的实际情况。

膜结构的刚度都可以用面刚度给出, 即 $E \times T$ 的值, 其中 E 为弹性模量, T 为膜的厚度。所以我们可以设定 SHELL181 单元的厚度为很小的值, 同时按比例调整材料的弹性模量, 只要保证 $E \times T$ 的值不变即可。

2. 找形方法的操作步骤

- ◆ 建立初设形态的模型。
- ◆ 初设形态由支座点控制, 以支座点为控制关键点, 建立初设形态几何模型 (包括面、线) 并划分单元。注意, 具有不同预应力的单元最好指定不同的材料, 以方便指定初应力。单元应该采用三角形形状, 因为索膜结构空间曲面可能扭曲, 用四边形时计算过程中可能会由于单元扭曲而出现问题。
- ◆ 施加约束 (通常在支座点)。基于索膜的特点, 仅约束平动自由度。
- ◆ 指定初应力。需注意的是, ANSYS 初应力基于单元坐标系。另外, 如果结构中每种材料具有同样的初应力, 则可以直接用命令完成初应力的施加, 如果每种材料具有不同的初应力, 则需要通过初应力文件来施加, 可以通过命令流自动生成初应力文件。
- ◆ 打开大变形效应, 进行计算。初设形态下预应力通常不会平衡, 会产生位移, 预应力会由于位移而释放。也就是说, 计算结束后的应力状态将与预应力不一致。
- ◆ 迭代计算, 完成找形, 新的体型则为平衡态体型。如果没有收敛, 则继续迭代。

15.4.1 问题描述与分析

图 15.71 所示为悬链线示意图。悬链面为一个上下端固定的等应力面，是由悬链线绕 Z 轴旋转得到的面，其方程为：

$$y = -a \left[\ln \left(\sqrt{x^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + z^2 - a^2} \right) - \ln a \right] + h \quad \left(x^2 + z^2 \geq a^2 \right)$$

(15-1)

本例中取 $a=5\text{m}$ ， $b=30\text{m}$ ，可计算出 $h=12.3894\text{m}$ 。通过这 3 个数据可以确定悬链面的上下边缘，通过找形找出平衡态。

膜材为面内各向同性材料，其刚度为 $E \times T=2.36 \times 10^5 \text{ N/m}$ ，泊松比为 0.4。

悬链面的平衡态形状与预应力大小无关（当然，预应力大小会对结构的受力特性产生影响，这不是本节的讨论范围），本例取 $\sigma_x \times T=\sigma_y \times T=2 \times 10^4 \text{ N/m}$ 。

计算中，壳单元的厚度采用 0.0001m ，则材料的弹性模量应为 $E=2.36 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ，预应力大小应为 $\sigma_x=\sigma_y=2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。由于模型对称，采用了 1/4 对称模型进行分析。

分析采用的命令流文件为 `membrane.txt`，其有限元模型如图 15.72 所示。这个例子在迭代计算 35 次后收敛，图 15.73 为收敛后的体型，即平衡态体型，可以看到已经非常接近要求的预应力值，其误差可以忽略不计。

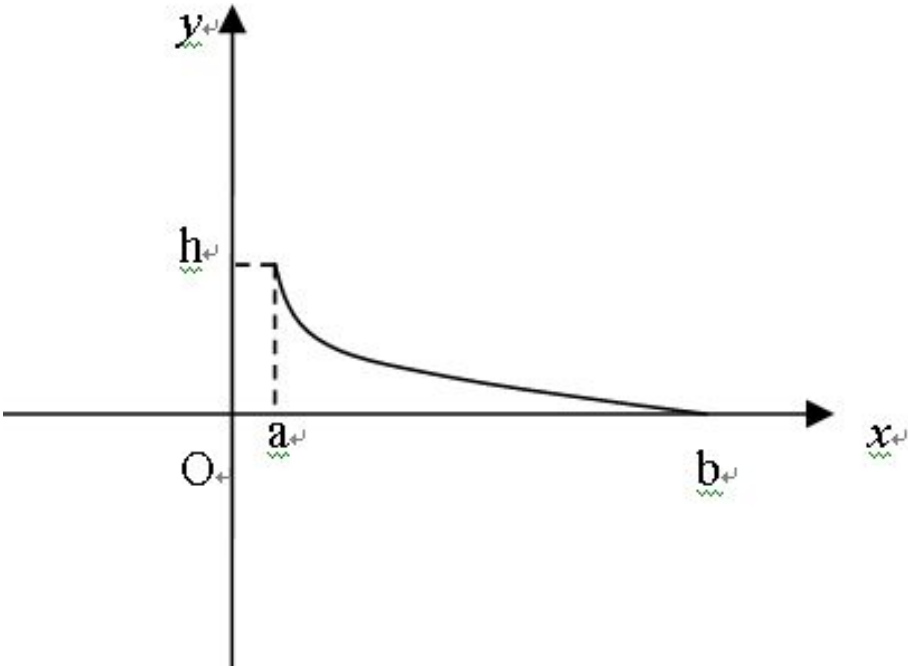


图 15.71 悬链线示意图

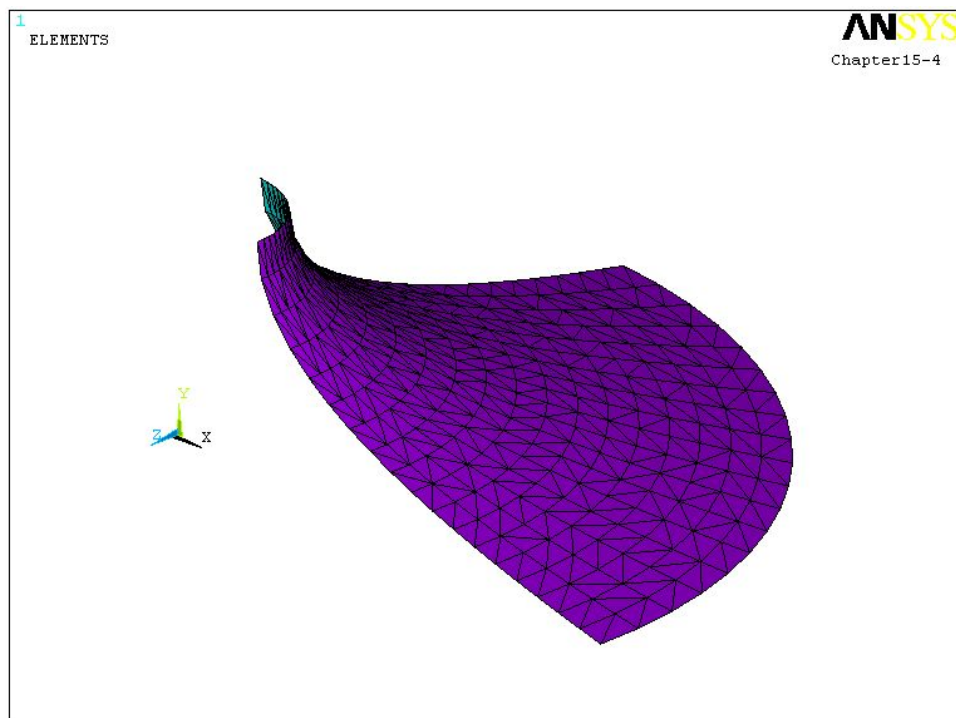


图 15.72 有限元模型示意图

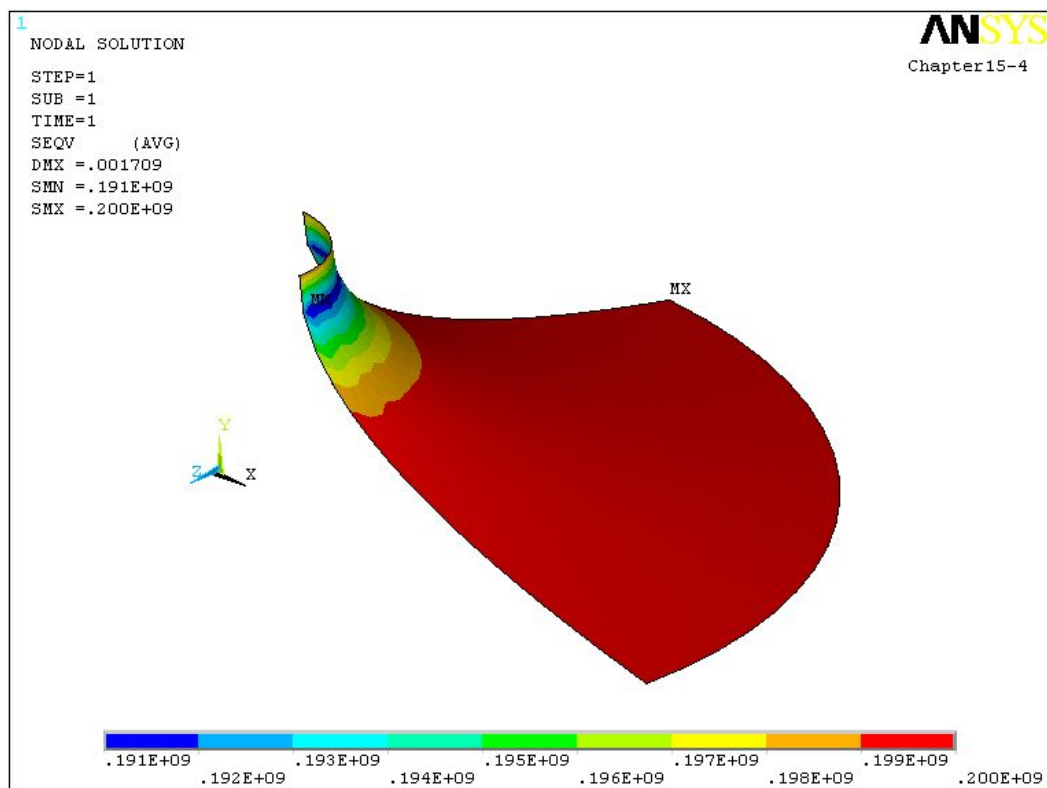


图 15.73 平衡态体型

15.4.2 求解过程

15.4.2.1 定义工作目录及文件名

step 1 启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，在 License 下拉列表框中选择 ANSYS Multiphysics 产品，在 Working Directory 输入栏中输入工作目录：C:\ANSYS12.0 Structural Finite Elements Analysis and Practice\Chapter 15\15-4，在 Job Name 栏中输入工作文件名：Chapter15-4。以上参数设置完毕后，单击 Run 按钮运行 ANSYS 程序。

15.4.2.2 定义单元类型和材料属性

step 1 选择 Main Menu→Preferences 命令，弹出 Preferences for GUI Filtering 对话框，在 Individual discipline(s) to show in the GUI 栏中选中 Structural 复选框，过滤掉 ANSYS GUI 菜单中与结构分析无关的选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 2 选择 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Shell 中的 4node 181 单元，如图 15.74 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Element Types 对话框。

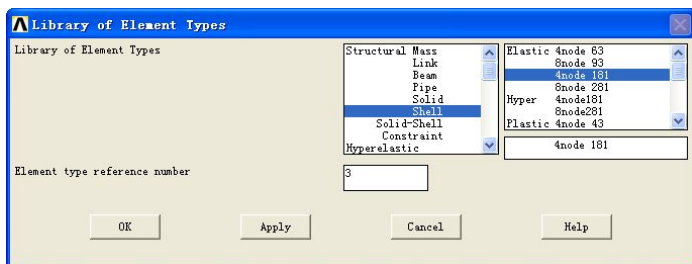


图 15.74 Library of Element Types 对话框

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 栏中依次展开 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.36E+009，在 PRXY 输入栏中输入 0.4，如图 15.75 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令，关闭该对话框。

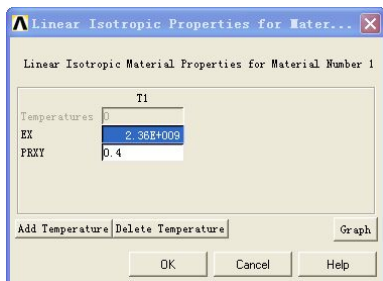


图 15.75 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add/Edit 命令，弹出 Create

and Modify Shell Sections 对话框, 如图 15.76 所示, 在 Layup 选项卡下的 Thickness 输入栏中输入 0.0001, 在 Integration Pts 输入栏中输入 5, 在 Section Offset 下拉列表框中选择 Mid-Plane 选项, 单击 OK 按钮关闭该对话框。在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material→Exit 命令, 关闭该对话框。

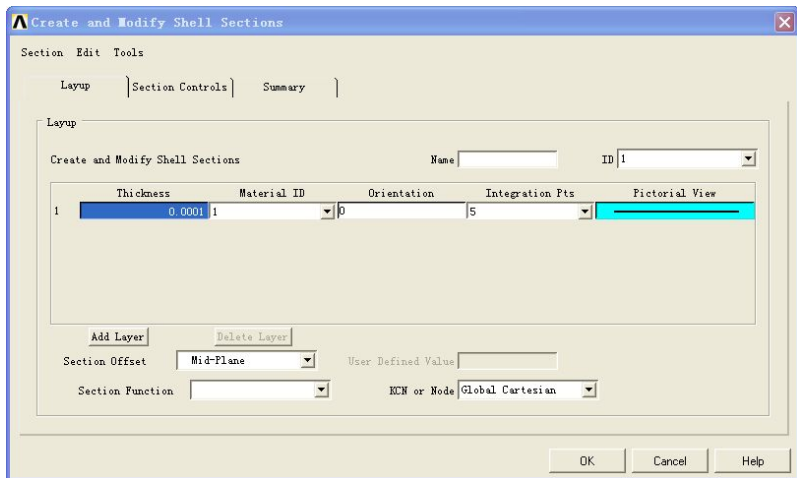


图 15.76 Create and Modify Shell Sections 对话框

step 5 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令, 保存上述操作过程。

15.4.2.3 创建几何模型

step 1 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Kpoints→In Active CS 命令, 弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框, 在 Keypoint number 输入栏中输入 1, 在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中依次输入 5、12.3894、0, 如图 15.77 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框。

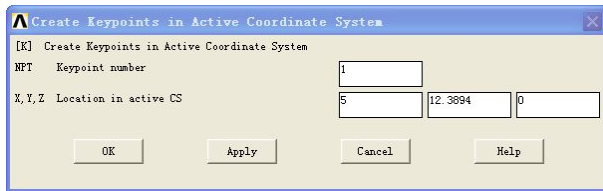


图 15.77 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

step 2 重复步骤 1, 依次输入关键点 2, 3, 4 的 (X, Y, Z) 坐标 (30, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 10, 0)。



可以在该对话框中单击 **Apply** 按钮依次添加关键点。

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord 命令, 弹出 Lines in Active 对话框, 选择 Min,Max,Inc 单选按钮, 在空白输入栏中输入 1,2, 如图 15.78 所示, 单击 OK 按钮关闭该对话框, 生成的结果如图 15.79 所示。

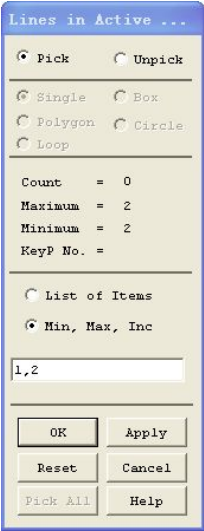


图 15.78 Lines in Active 对话框

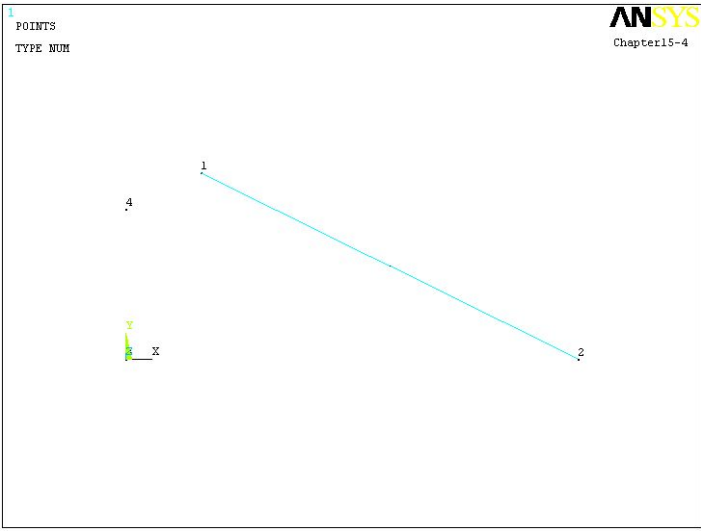


图 15.79 生成线后的结果

step 4 选择 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Lines→About Axis 命令，弹出 Sweep Lines about Axis 拾取菜单，如图 15.80 所示，单击 OK 按钮，在屏幕上选择线，然后弹出 Sweep Lines about Axis 拾取菜单，如图 15.81 所示，单击 OK 按钮，选择关键点 3、4，单击 OK 按钮，弹出 Sweep Lines about Axis 对话框，如图 15.82 所示，在输入栏中分别输入 90 和 1，单击 OK 按钮关闭该对话框，生成如图 15.83 和图 15.84 所示的模型。

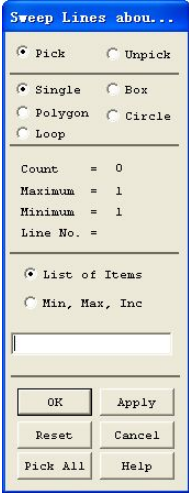


图 15.80 Sweep Lines about Axis 拾取菜单

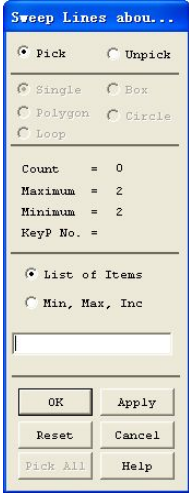


图 15.81 Sweep Lines about Axis 拾取菜单



图 15.82 Sweep Lines about Axis 对话框

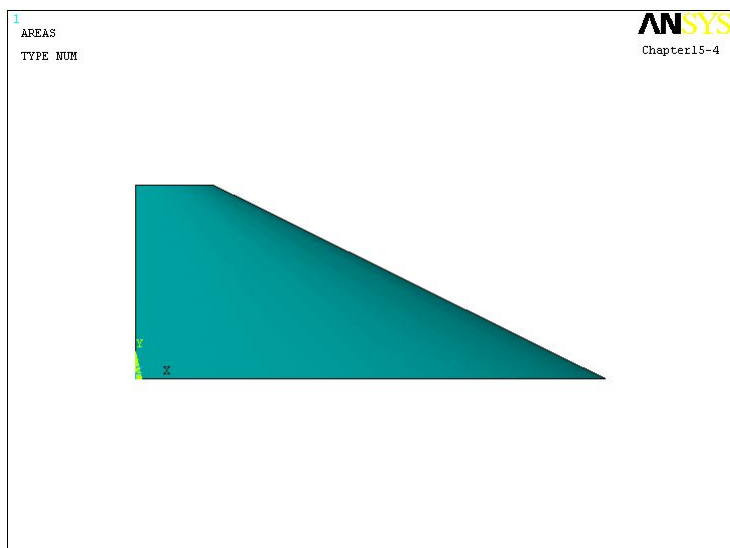


图 15.83 有限元模型立面图

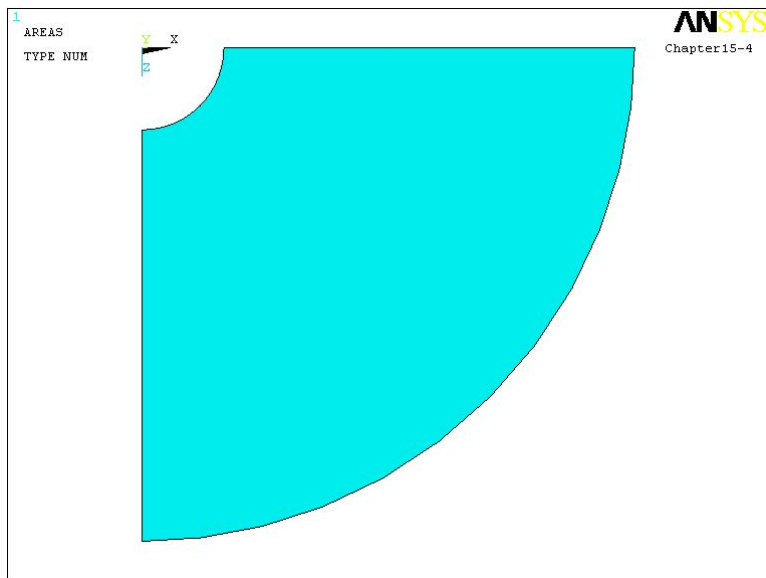


图 15.84 有限元模型平面图

15.4.2.4 划分网格

step 1

选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All Lines 命令，弹出 Element Size on All Selected Lines 对话框，在 NDIV 输入栏中输入 18，单击 OK 按钮关闭该对话框。



若在对话框中不输入任何数字，则表示按默认值进行运算。

step 2

选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesher Opts 命令，弹出 Mesher Options 对

话框，如图 15.85 所示，在 Mesher Type 栏中选择 Mapped 单选按钮，单击 OK 按钮，弹出 Set Element Shape 对话框，如图 15.86 所示，在 2D Shape key 下拉列表框中选择 Tri（三角形分网）选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。

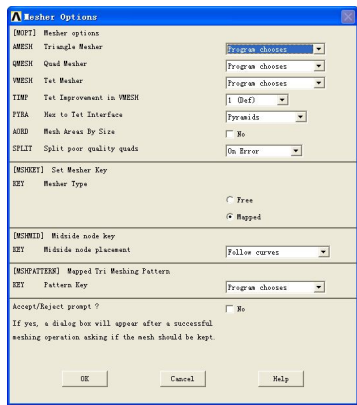


图 15.85 Mesher Options 对话框

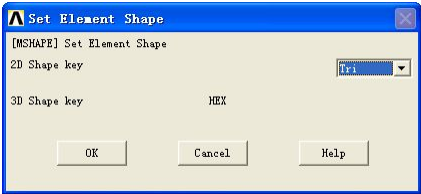


图 15.86 Set Element Shape 对话框

step 3 选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided 命令，弹出 Mesh Areas 对话框，选择图中模型，单击 OK 按钮关闭该对话框，分网后的模型如图 15.87 所示。

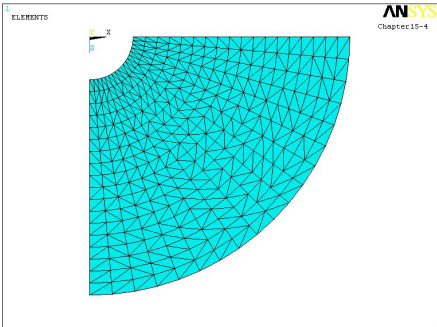


图 15.87 分网后的模型

step 4 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

15.4.2.5 加载求解

step 1 选择 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines 命令，弹出 Apply U,ROT on Lines 拾取菜单，用鼠标拾取圆环的内、外环向边界线，如图 15.88 所示，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Lines 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX 选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。重复上述步骤，依次选取 UY、UZ 选项。

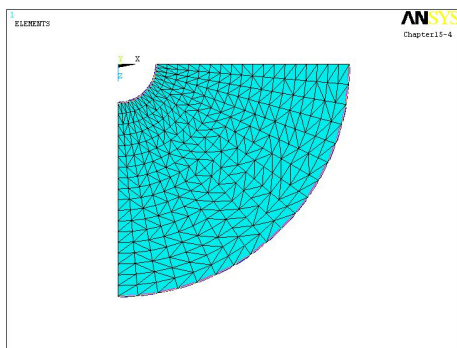


图 15.88 拾取圆环的内、外环向边界线

step 2

选择 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Lines 命令，弹出 Apply U,ROT on Lines 拾取菜单，用鼠标拾取圆环的两条径向边界线，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U,ROT on Lines 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX 选项，单击 OK 按钮关闭该对话框。重复上述步骤，选取 UZ 选项。

提示

该操作为对圆环内、外环向边界线 X、Y、Z 三个方向的位移进行固定约束，对圆环的两条径向边界线 X、Z 两个方向的位移进行固定约束，即允许膜片在 Y 向进行移动。

step 3

在命令输入框中输入如下命令：inistate,define,all,,,2e8,2e8,,,,, 如图 15.89 所示，按回车键。



图 15.89 命令输入框

提示

该操作为对膜面施加 X、Y 向预应力。

step 4

选择 Main Menu → Solution → Analysis Type → New Analysis 命令，弹出 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

step 5

选择 Main Menu → Solution → Analysis Type → Sol'n Controls 命令，弹出 Solution Controls 对话框，如图 15.90 所示，单击 Basic 选项卡，在 Analysis Options 下拉列表框中选择 Large Displacement Static 选项，在 Time Control 栏的 Time at end of loadstep 输入框中输入 1，在 Automatic time stepping 下拉列表框中选择 On 选项，在 Number of substeps 栏中输入 1，在 Max no. of substeps 栏中输入 10，在 Min no. of substeps 输入 1，在 Write Items to Results File 栏中的 Frequency 下拉列表框中选择 Write every Nth substep 选项，在 where N=输入栏中输入 all，单击 OK 按钮。

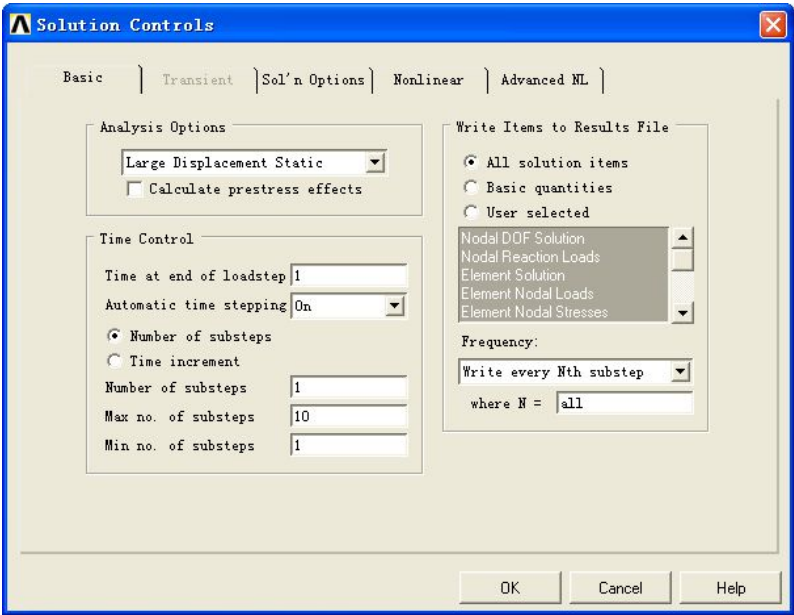


图 15.90 Solution Controls 对话框

- step 6** 选择 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。
- step 7** 求解结束时，弹出 Note 对话框，单击 Colse 按钮关闭该对话框。
- step 8** 选择 Utility Menu→File→Save as Jobname.db 命令，保存上述操作过程。

15.4.2.6 查看求解结果

- step 1** 选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape 命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 栏中选择 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的轮廓，如图 15.91 所示。

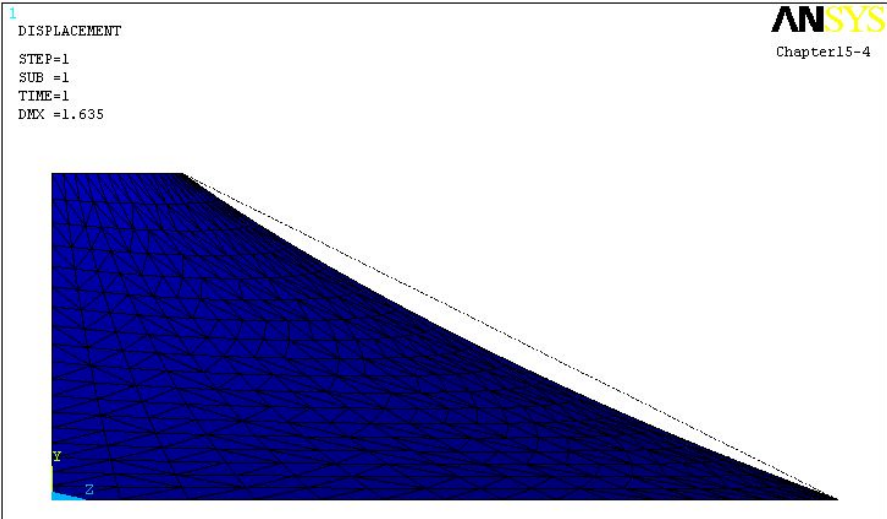


图 15.91 变形后的几何形状和未变形的轮廓

step 2

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum 选项，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.92 所示的位移场分布等值线图。

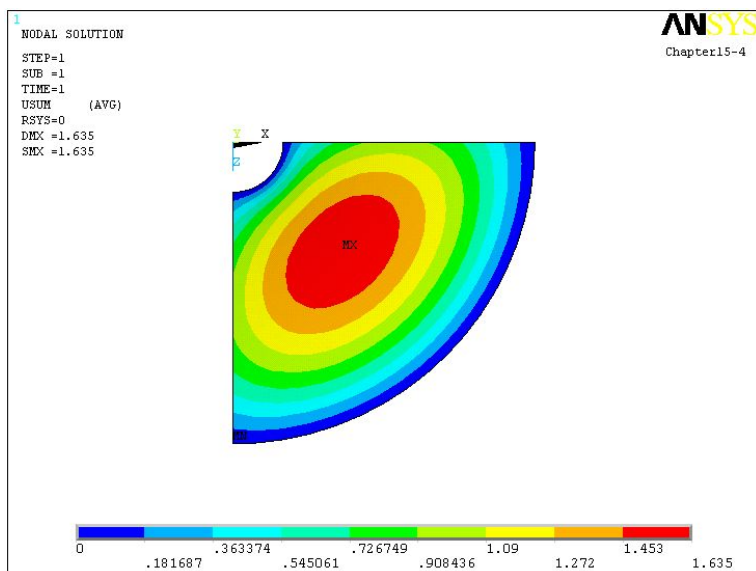


图 15.92 位移场分布等值线图

step 3

选择 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中依次展开 Nodal Solution→Stress→von Mises stress 选项，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 15.93 所示的 Mises 等效应力场分布等值线图。

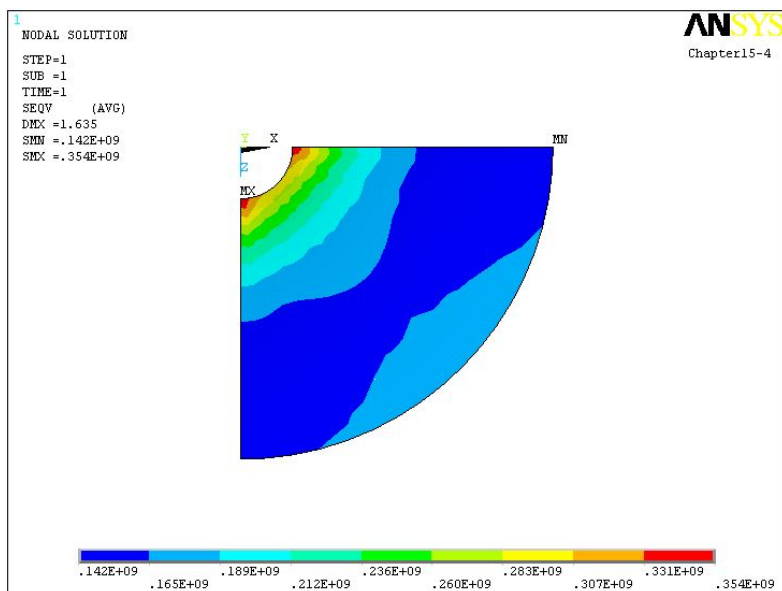


图 15.93 Mises 等效应力场分布等值线图



step 4

选择 **Utility Menu**→**File**→**Exit** 命令,弹出 **Exit from ANSYS** 对话框,选择 **Save Everything** 单选按钮,单击 **OK** 按钮,关闭 **ANSYS** 程序。



在进行一步找形后,读者可发现,膜面预应力与预设值之间的容差较大,减小容差的方法是进行多次自平衡迭代,限于篇幅此处不再详述,读者可查找相关文献进行研究。

15.4.3 命令流

```
/filename,Chapter15-4,0
/PREP7
ET,1,SHELL181
MP,EX,1,2.36E9
MP,PRXY,1,0.4
sect,1,shell,,
secdata, 1e-4,1,0.0,5
secoffset,MID
K,1,5,12.3894,0
K,2,30,0,0
K,3,0,0,0
K,4,0,10,0
LSTR,      1,      2
AROTAT,all, , , , ,3,4 ,90,1,
LESIZE,ALL, , ,18, , , ,1
MSHAPE,1,2D
MSHKEY,1
AMESH,ALL
/SOL
LSEL,S,LINE, ,1
LSEL,a,LINE, ,2
DL,ALL,,UX,
DL,ALL,,UZ,
LSEL,S,LINE, ,3
LSEL,a,LINE, ,4
DL,ALL,,UX,
DL,ALL,,UY,
DL,ALL,,UZ,
ALLSEL,ALL
inistate,define,all,,,,2e8,2e8, , , ,
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,1,10,1
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
TIME,1
SOLVE
```




```
/POST1  
SET, LAST  
PLNSOL, U, SUM, 0, 1  
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0
```

15.5 小结

本章对 **ANSYS** 在土木工程中的应用进行了详细的阐述，同时给出了 4 个具有代表性的土木工程结构实际案例，希望能帮助读者提高 **ANSYS** 的实际应用水平。



附录 A ANSYS 结构分析常用命令参考

表 A.1 文件操作命令

命令	功能说明
FINISH	正常退出处理模块
/CLEAR	清除当前数据库
/FILENAME	改变工程文件名称
/CWD	改变当前工作目录
/TITLE	指定主标题
SAVE	保存数据库
RESUME	恢复数据库
LGWRITE	将数据库命令的日志记录写到文件
/INPUT	从文件中输入命令
/OUTPUT	将输出定向到文件或屏幕
/RENAME	文件改名
/COPY	文件复制
/DELETE	文件删除
/EXIT	退出 ANSYS
/AUX2	解读二进制文件
/ASSIGN	重新指定文件识别符
/FTYPE	设置二进制文件
/FDELETE	删除二进制文件
/BATCH	设置程序为命令流文件
/CLOG	复制 LOG 文件
/PREP7	进入建立模型前处理模块
/POST1	进入一般结果后处理模块
/POST26	进入时间历程后处理模块
/SOLU	进入求解处理模块
HELP	帮助信息

表 A.2 选择命令

命令	功能说明
ALLSEL	选择所有实体

(续表)

命令	功能说明
NSEL	选择节点作为一个子集
NSLA	选择与已选面相连的节点
NSLE	选择与已选单元相连的节点
NSLK	选择与已选关键点相连的节点
NSLL	选择与已选线相连的节点
NSLV	选择与已选体相连的节点
KSEL	选择关键点或者硬点作为一个子集
KSLL	选择与已选线相连的关键点
KSUN	选择与已选节点相连的关键点
LSEL	选择线作为一个子集
LSLA	选择包含已选面的线
LSLK	选择包含已选关键点的线
VSEL	选择体作为一个子集
VSLA	选择包含已选面的体
ASLL	选择包含已选线的面
ASEL	选择面作为一个子集
ASLV	选择包含已选体的面
ESEL	选择单元面作为一个子集
ESLA	选择包含已选面的单元
ESLL	选择包含已选线的面单元
ESLN	选择包含已选节点的单元
ESLV	选择包含已选体的单元

表 A.3 组件命令

命令	功能说明
CM	将几何体组合成一个部件
CMMOD	编辑修改元件名称
CMDELE	删除一个部件或者部件组合体的定义
CMEDIT	编辑部件定义
CMGRP	将部件组合成部件组合体
CMLIST	列出包含在部件或者组合体中的实体对象
CNPLOT	绘制包含在部件或者组合体中的实体对象
CMSEL	选择部件和组合体作为一个子集

表 A.4 工作平面命令

命令	功能说明
KWPAVE	移动工作面原点到关键点的位置处
KWPLAN	过 3 个关键点定义工作面
LWPLAN	以某一条线为法线定义工作面
NWPAVE	移动工作面原点到节点的平均位置
NWPLAN	过 3 个节点定义工作面
WPAVE	移动工作面原点到指定点的平均位置
WPCSYS	按照某个坐标系定义工作面的位置
WPLANE	定义工作面来方便拾取操作
WPOFFS	移动工作面
WPROTA	旋转工作面
WPSTYL	控制工作面的显示和显示风格

表 A.5 坐标系命令

命令	功能说明
CLOCAL	相对于当前激活的坐标系定义局部坐标系
CS	过 3 个节点位置定义局部坐标系
CSCIR	定义非笛卡尔局部坐标系的原点
CSDELE	删除局部坐标系
CSKP	过 3 个关键点位置定义局部坐标系
CSLIST	列出坐标系
CSWPLA	过工作面原点定义局部坐标系
CSYS	激活以前定义过的坐标系
LOCAL	用位置和方位定义局部坐标系

表 A.6 参数化设计语言（APDL）命令

命令	功能说明
*AFUN	指定参数表达式中角度函数的单位
*ASK	提示用户输入一个参数值
*DEL	删除一个参数
*DIM	定义数组参数并指定其维数
*GET	提取数据库中的数值，并赋予一个用户指定的变量
/INQUIRE	将系统信息保存到一个参数
PARRES	从文件中读入参数
*SET	给一个参数赋值
*STATUS	列表显示当前的所有参数和缩写

(续表)

命令	功能说明
*TREAD	从外部数据文件中读取数据，并存储到一个表/数组参数中
*VFILL	按照一定规律填充数组参数
*VGET	提取数据库中的数据，并存储到一个数组中
*VREAD	读取数据到一个数组参数中
/TEE	在执行该命令的同时，将命令写入到指定文件
*CFCLOS	关闭一个 command 文件
*CFOPEN	打开一个 command 文件
*CFWRITE	写出 ANSYS 命令（或者字符串）到一个 command 文件
*CREATE	打开或者创建一个宏文件
*ULIB	识别一个宏文件
*END	关闭宏文件
*USE	执行一个宏文件
*ABBR	定义一个缩写
ABBRES	从一个编码文件中读入缩写
ABBSAV	将当前的缩写保存到一个编码文件
*CYCLE	从当前 do 循环直接跳到下一次循环进程
*DO	定义 do 循环的起始
*ELSE	用于 if-then-else 语句块的最后一个条件起始命令字
*ELSEIF	用于 if-then-else 语句块的中间条件起始命令字
*ENDDO	结束一个 do 循环
*ENDIF	结束一个 if-then-else 语句块
*EXIT	跳出一个 do 循环
*GO	将命令流程跳转到指定标识字行
*IF	if-then-else 语句块的起始条件命令字
*REPEAT	重复前面的命令

表 A.7 单元类型定义与属性设置命令（/PREP7）

命令	功能说明
DOF	给当前自由度增加自由度
ET	从单元库中定义单元类型
ETCHG	改变单元类型为它们相应的类型
ETDELE	删除单元类型
ETLIST	列出已经定义的单元类型
KEYOPT	设置单元选项
R	定义单元实常数
RDELE	删除实常数

(续表)

命令	功能说明
RLIST	列出实常数
RMODIF	修改实常数
RMORE	增加实常数
MP	定义线性材料属性
MPCOPY	利用材料参考号，复制材料模型数据
MPDATA	定义与温度表相联系的属性数据
MPDELE	删除线性材料属性
MPLIST	列出线性材料属性
MPPLOT	绘制线性材料属性随温度变化的曲线
MPREAD	从包含材料属性的文件读入材料数据
MPTEMP	给材料属性定义一个温度表
TBFT	对材料数据执行曲线拟合操作

表 A.8 关键点创建与管理命令 (/PREP7)

命令	功能说明
K	在给定坐标点创建关键点
KBETW	在两个关键点之间创建一个关键点
KFILL	在两个关键点之间创建多个关键点
KGEN	复制创建关键点
KSYMM	通过坐标轴镜像创建关键点
KL	在既有线的某位置上创建关键点
KNODE	在已有的节点位置定义关键点
KCENTER	在圆弧中心定义关键点
KDELE	删除没有执行网格划分的关键点
KLIST	列出已经定义的关键点或者硬点
KPLOT	图形显示被选中的关键点
KMODIF	修改已有的关键点
KDIST	计算并显示两个关键点之间的距离
KMOVE	计算并将关键点移动到交点位置
KSCALE	对关键点进行缩放
KSUM	对关键点进行计算并输出几何要素

表 A.9 线创建与管理命令 (/PREP7)

命令	功能说明
L	在两个关键点之间创建线

(续表)

命令	功能说明
LSTR	由两个关键点创建直线
LARC	通过两个关键点或半径创建圆弧线
LFILLT	在两条相交线的交点附近生成倒角圆弧线
LGEN	复制创建线
LCOMB	将多条线合并创建为一条线
LDIV	将一条线分为多条线
LXTND	沿着斜率方向延长一条线
LANG	生成和一条线成一定角度的直线
L2ANG	生成与两个已有的线成一定角度的直线
LAREA	在一个面上的两个关键点之间生成最短线
LDRAG	关键点沿路径扫略生成线
LROTAT	将关键点绕某一条轴旋转生成圆弧线
LSYMM	通过坐标轴镜像生成线
LDELE	删除没有网格划分的线
LLIST	列出已经定义的线
LPLOT	图形显示被选中的线
LSSCALE	对线进行缩放
LSUM	计算并显示被选中的线的几何统计信息
BSPLIN	过一组关键点定义多段线
SPLINE	过一系列关键点生成多段线
CIRCLE	定义圆

表 A.10 面创建与管理命令 (/PREP7)

命令	功能说明
A	通过连接关键点定义面
AL	用前面已经定义的线围绕生成面
ADRAG	通过将一条线沿着路径拖动生成扫描面
AROTAT	将线围绕一条轴回转生成弧面
AOFFST	通过偏移一个给定的面生成面
AFILLT	在两个相交面的相交位置生成倒角面
AGEN	复制创建新面
ARSYM	通过坐标轴镜像创建新面
ASUB	用已经存在面的形状生成一个面
ALIST	列出已经定义的面
ARSCALE	对面进行缩放
APLOT	图形显示选中的面

(续表)

命令	功能说明
ADELE	删除未划分网格的面
ASUM	计算并打印被选中的面的几何统计信息
POLY	基于工作面坐标轴，建立多面体面
RECTNG	在工组平面任意位置，建立一个矩形区域
RPOLY	在工作面原点处，建立一个规则的多边形面

表 A.11 体创建与管理命令 (/PREP7)

命令	功能说明
V	通过关键点定义体
VA	通过面定义体
VDRAG	将面沿着一个路径拖动生成体
VROTAT	将面绕一个轴回转生成柱体
VOFFST	偏移给定面生成体
VEXT	拉伸一个面生成体
VGEN	复制生成体
VSMM	通过坐标轴镜像创建体
VTRAN	通过坐标系转换创建体
VLSCALE	对体进行缩放创建体
VLIST	列出已经定义的体
VPLOT	图形显示被选中的体
VDELE	删除未划分网格的体
VSUM	计算并打印被选中的体的几何统计信息
BLC4	通过指定角点建立一个矩形区域或者方块体
BLC5	通过中心点和角点建立一个矩形区域或者方块体
BLOCK	在工作平面坐标系建立一个方块体
CON4	在工作平面任意位置建立圆锥体
CONE	在工作平面原点处建立圆锥体
CYL4	在工作平面任意位置建立柱面或者圆柱体
CYL5	用两个端点建立柱面或者圆柱体
CYLIND	在工作平面原点处建立圆柱体
PCIRC	在工作平面原点处建立柱面
PRISM	基于工作面坐标系建立棱柱体
RPR4	在工作面任意位置建立规则的多边形面或者棱柱体
RPRISM	在工作面原点处建立一个规则的棱柱体
SPH4	在工作面任意位置建立球体
SPH5	利用直径的两个端点建立球体

(续表)

命令	功能说明
SHPERE	在工作面原点处建立球体
TORUS	建立圆环体

表 A.12 节点创建与管理命令 (/PREP7)

命令	功能说明
N	定义节点
NGEN	复制生成节点
NSYM	生成一组对称位置的节点
NKPT	在关键点位置定义节点
NDIST	计算并显示两个节点之间的距离
NDELE	删除节点
NLIST	列出节点
NMODIF	修改已有的节点
NPLOT	图形显示节点
NSCALE	缩放节点
NREAD	从文件中读入节点
NWRITE	将节点信息写入到文件

表 A.13 单元创建与管理命令 (/PREP7)

命令	功能说明
E	通过节点连接定义单元
EINTF	在重合节点中间定义两节点单元
EGEN	复制生成单元
EMODIF	修改前面已经定义过的单元
EMORE	给刚才定义过的单元增加更多节点
EN	用单元编号和节点连接定义单元
ENGEN	用已有的单元模式生成单元
ENORM	重新定位壳单元法线
ENSYM	通过对称复制生成单元
EDELE	从模型中删除选中的单元
ELIST	列出单元
EPLOT	显示单元
ERead	从一个文件中读入单元
ERRANG	指定要从文件读入的单元的范围
ESURF	在已有单元的自由表面上生成单元



(续表)

命令	功能说明
ESYM	用对称复制的方法生成单元
ESYS	设置单元坐标系属性
EWRITE	将单元信息保存到文件

表 A.14 布尔操作命令 (/PREP7)

命令	功能说明
AADD	将多个面相加，组成一个面
AGLUE	通过“粘贴”操作生成新的面
AINA	确定多个面的交集
AINP	确定两个面的交集
AINV	确定一个面和一个体的交
AOVLAP	叠合面
APTN	分区组合面
ASBA	面相减
ASBL	从面中减去线
ASBV	从体中减去面
ASBW	用工作面分开面
BOPTN	指定布尔操作选项
BTOL	指定布尔操作的容差
LCSL	在线的交点位置处截开线
LGLUE	通过“粘合”操作生成线
LINA	确定线和面的交
LINL	确定多条线的公共相交部分
LINP	确定两条线的公共相交部分
LINV	确定线和体的公共相交部分
LOVLAP	叠合线
LPTN	分区组合线
LSBA	从线上减去面 (截开线)
LSBL	从线上减去线
LSBV	从线上减去体
LSBW	从线上减去工作面 (截开线)
VADD	体相加，组成一个体
VGLUE	通过“粘合”操作生成新体
VINP	确定两个体的交集
VINV	确定体的交集
VOVLAP	叠合体



(续表)

命令	功能说明
VPTN	分区组合体
VSBA	从体中减去面
VSBV	从体中减去体
VSBW	用工作面截开体

表 A.15 单元网格划分命令 (/PREP7)

命令	功能说明
ACCAT	将多个面连接起来，准备划分映射网格
ACLEAR	删除与被选中的面相连接的节点和面单元
AESIZE	指定面单元划分的单元尺寸
AMAP	按照指定面的角点，生成 2-D 映射网格
AMESH	对面划分网格
AREFINE	在指定面周围，加密网格
CHKMSH	检查前面网格划分的面和体
CLRMSHLN	清除网格
DESIZE	控制默认的单元尺寸
EREFINE	在指定单元附近加密网格
ESIZE	指定默认线的剖分段数
FVMESH	由分离外部面单元方法，生成节点和四面体单元
IMESH	沿着线或者面，生成节点和内部单元
KATT	将属性与选中的、未划分网格的关键点联系起来
KCLEAR	删除与关键点相连接的节点和单元
KESIZE	指定距离关键点最近的单元的边长
KMESH	在关键点附近，生成节点和单元
KREFINE	在指定的关键点周围，加密网格
KSCON	指定扭曲面网格附近的关键点
LATT	将属性与选中的、未划分网格的线联系起来
LCCAT	将多条线连接成一条线，用于映射网格
LCLEAR	删除与选中线相连接的节点和线单元
LESIZE	指定未划分网格的线的划分份数和间隔比例
LMESH	沿着线生成节点和线单元
LREFINE	在指定线的周围，加密网格
MAT	设置单元材料属性指针
MCHECK	检查网格连接
MODMSH	控制实体模型和有限元模型之间的关系
MOPT	指定单元网格划分选项

(续表)

命令	功能说明
MSHAPE	对于支持多种形状的单元，指定网格划分的单元形状
MSHKEY	指定在单元网格划分时，是否使用映射网格
NREFINE	在指定节点位置加密网格
SHPP	控制单元形状检查
SMRTSIZE	给自动单元尺寸指定网格划分参数
VMESH	对体生成节点和体单元
VSWEEP	对未划分网格的体，用从相邻面扫过体的方法填充生成网格

表 A.16 耦合与约束方程命令 (/PREP7)

命令	功能说明
CP	定义一组耦合自由度
CPDELE	删除耦合自由度
CPINTF	在图形界面上定义耦合自由度
CPLGEN	从已有的某一个耦合自由度中生成耦合节点
CPLIST	列出耦合自由度
CPNGEN	定义、修改或者添加一组耦合自由度
CPSGEN	从已有的耦合自由度中生成耦合节点
CE	定义相关自由度的约束方程
CECYC	给循环对称分析，生成约束方程
CEDELE	删除约束方程
CEINTF	在图形界面上生成约束方程
CELIST	列出约束方程
CERIG	定义一个刚性区域
CESGEN	从已有组生成一组约束方程

表 A.17 横截面设置命令 (/PREP7)

命令	功能说明
SECDATA	定义梁截面的几何形状
SECNUM	指定梁截面号
SECOFFSET	定义梁截面的偏移量
SECPLLOT	显示梁截面的几何形状
SECREAD	读入一个用户自定义的梁截面库
SECTYPE	将截面类型和截面号联系起来
SECWRITE	建立包含用户自定义截面的属性信息
SLIST	汇总当前所有已经定义的截面的截面属性信息

表 A.18 求解分析选项设置命令 (/SOLU)

命令	功能说明
ANTYPE	指定分析类型
CHECK	检查当前数据库项目的完整性
EQSLV	指定方程求解器类型
EXPASS	指定分析的展开项
ARCLEN	激活弧长法
ARCTRM	控制弧长解法是否终止
CNVTOL	设置非线性分析的收敛值
MXPAND	指定模态或者屈曲分析中要展开的模态个数
NEQIT	指定最大平衡循环迭代次数
NLGEOM	大变形效应
NROPT	指定牛顿—拉普森求解
PRED	激活非线性分析的预测器
PSTRES	指定是否考虑预应力效果
SSTIF	激活应力刚化效应
MXPAND	指定模态或者屈曲分析中要展开的模态个数
SUBOPT	指定子空间循环特征值提取的选项
HARFRQ	定义谐波相应分析的频率范围
HROPT	指定谐波分析选项
MEXPAND	指定模态或者屈曲分析中要展开的模态个数
LSCLEAR	清除载荷和载荷步选项
LSDELE	删除载荷步文件
LSREAD	读入载荷和载荷步选项数据
LSSOLVE	读入和求解多个载荷步
LSWRITE	将载荷和载荷步选项数据保存到文件

表 A.19 施加约束命令 (/SOLU)

命令	功能说明
D	对节点施加自由度约束
DLIST	列出自由度上的 DOF 约束
DDELE	删除自由度上的 DOF 约束
DSYM	对节点施加对称自由度约束
DCUM	累加节点自由度约束
DK	定义关键点上的 DOF 约束
DKLIST	列出关键点上的 DOF 约束
DKDELE	删除关键点上的 DOF 约束
DL	定义线上的对称或者反对称 DOF 约束

(续表)

命令	功能说明
DLIST	列出线上的 DOF 约束
DLDELE	删除线上的 DOF 约束
DA	定义面上的对称或者反对称 DOF 约束
DALIST	列出面上的 DOF 约束
DADELE	删除面上的 DOF 约束
DTRAN	将几何模型上的约束传到有限元模型上

表 A.20 施加集中载荷相关命令 (/SOLU)

命令	功能说明
F	指定节点上的载荷力
FDELE	删除节点上的载荷力
FLIST	列出节点上的载荷力
FSCALE	缩放数据库中的载荷值
FCUM	指定要累计计算的载荷力
FK	定义关键点上的载荷力
FKDELE	删除关键点上的载荷力
FKDELE	列出关键点上的力
FTRAN	将实体模型上的力传递给有限元模型

表 A.21 施加面载荷相关命令 (/SOLU)

命令	功能说明
SF	指定节点上的表面力
SFSCALE	缩放节点上的表面力
SFCUM	指定要累计计算的表面力
SFFUN	指定变化的表面力
SFGRAD	指定表面力的变化斜率
SFLIST	列出表面力
SFDELE	删除表面力
SFE	指定单元上的表面力
SFELIST	列出单元上的表面力
SFEDELE	删除单元上的表面力
SFBEAM	指定梁单元上的表面力
SFL	指定线上的表面力
SFLLIST	列出线上的表面力
SFLDELE	从线上删除表面力

(续表)

命令	功能说明
SFA	指定被选中面上的表面力
SFALIST	列出被选中面上的表面力
SFADELE	删除被选中面上的表面力
SFTRAN	将实体模型上的表面力传输给有限元模型

表 A.22 施加体载荷相关命令 (/SOLU)

命令	功能说明
BF	定义节点上的体载荷
BFSCAL	缩放节点上的体载荷
BFCUM	指定要累计计算的节点的体载荷
BFUNIF	给所有节点施加均匀分布的体载荷
BFLIST	列出节点上的体载荷
BFDELE	删除节点上的体载荷
BFE	定义单元体载荷
BFESCAL	缩放单元体载荷
BFECUM	指定是否忽略随后的单元体载荷
BFELIST	列出单元体载荷
BFDELE	删除单元体载荷
BFK	定义关键点上的体载荷
BFKLIST	列出关键点上的体载荷
BFKDELE	删除关键点上的体载荷
BFL	定义线上的体载荷
BFLLIST	列出线上的体载荷
BFLDELE	删除线上的体载荷
BFA	定义面上的体载荷
BFALIST	列出面上的体载荷
BFADELE	删除面上的体载荷
BFV	定义体上的体载荷
BFVLIST	列出体上的体载荷
BFVDELE	删除体上的体载荷
BFTRAN	将实体模型上的体载荷传输给有限元模型

表 A.23 施加惯性载荷相关命令 (/SOLU)

命令	功能说明
ACEL	指定结构线性加速度

(续表)

命令	功能说明
OMEGA	指定结构的转动角速度
DOMEGA	指定结构的转动角加速度
CGLOC	指定加速度坐标系的原点位置
CGOMGA	指定坐标系下的转动角速度
DCGOMG	指定坐标系下的转动加速度
CMOMEGA	指定单元部件围绕用户自定义转动轴的转动角速度
CMDOMEGA	指定单元部件围绕用户自定义转动轴的转动角加速度
IRLF	指定不计算转动惯量的影响

表 A.24 读入结果文件相关命令 (/POST1)

命令	功能说明
FILE	指定拟读入的结果文件
INRES	指定从结果文件恢复的数据
SET	从结果文件中读出指定的数据组
SUBSET	为所选择的模型读入结果
APPEND	从结果文件读入数据追加到当前数据库
LCZERO	将数据库中的结果置零
RESUME	恢复模型数据库

表 A.25 图形显示结果命令 (/POST1)

命令	功能说明
PLDISP	图形显示变形后的结构
PLNSOL	用连续等高线，图形显示求解节点结果
PLESOL	用不连续单元等高线，图形显示求解单元结果
PLVECT	以矢量方式，图形显示求解结果

表 A.26 列表显示结果命令 (/POST1)

命令	功能说明
PRNSOL	列出节点结果
PRESOL	列出单元结果
PRSSOL	列出单元剖面结果
PRRSOL	列出约束节点反力
PRNLD	列出单元节点载荷的总和
PRVECT	列出矢量大小和方向余弦
PRJSOL	列出结合单元结果

(续表)

命令	功能说明
PRRFOR	列出节点约束反力
PRITER	列出求解信息汇总数据

表 A.27 单元表相关命令 (/POST1)

命令	功能说明
ETABLE	为后续处理定义单元表
PLETAB	显示单元表项目
PRETAB	列表显示单元表结果
PLLS	沿单元用等值面显示结果
SABS	单元表绝对值操作
SSUM	计算并输出单元表数据之和
SADD	单元表相加生成新的单元表
SMULT	单元表相乘生成新的单元表
SMAX	单元表取最大值生成新的单元表
SMIN	单元表取最小值生成新的单元表
SEXP	单元表幂运算生成新的单元表
VCROSS	矢量叉积生成新单元表
VDOT	矢量点积生成新单元表

表 A.28 路径相关命令 (/POST1)

命令	功能说明
PATH	定义路径名及路径参数
PPATH	定义路径的几何结构
PDEF	映射结果到路径上
PLPATH	图形显示路径项数据
PLPAGM	沿路径几何形状显示路径项数据
PLSECT	图形显示膜内力及弯曲应力
PRPATH	列表显示路径项数据
PRSECT	列表显示膜内力及弯曲应力
PMAP	定义插值点，创建路径几何映像
PRANGE	定义路径长度的范围
PADELE	删除既有路径
PCALC	对路径项数据进行运算
PCROSS	路径项矢量叉积
PDOT	路径项矢量点积



(续表)

命令	功能说明
PVECT	在路径上创建一组单位矢量
PASAVE	保存路径及数据
PARESU	恢复路径及数据
PAGET	将路径信息数据存入数组
PAPUT	从数组中取出路径项信息
PSEL	选择路径

表 A.29 载荷工况相关命令 (/POST1)

命令	功能说明
LCDEF	从结果文件中的一组结果建立载荷工况
LCFILE	从载荷工况文件创建一个载荷工况
LCWRITE	通过将结果写入载荷工况文件，建立载荷工况
LCASE	将载荷工况信息读入到数据库
LCOPER	执行载荷工况操作
LCSEL	选择一组载荷工况
LCABS	给载荷工况操作指定绝对值
LCFACT	给载荷工况操作定义缩放系数
LCOPER	执行载荷工况操作
LCSEL	选择一组载荷工况
LCABS	给载荷工况操作指定绝对值
LCFACT	给载荷工况操作定义缩放系数
LCZERO	对数据库中的载荷工况结果清零

表 A.30 变量定义相关命令 (/POST26)

命令	功能说明
NSOL	以节点数据定义变量
ESOL	以单元的节点数据定义变量
RFORCE	以节点反力定义变量
EDREAD	以显示动力分析结果定义变量
GAPF	以间隙力定义变量
ANSOL	以平均的节点数据定义变量
SOLU	以结果总体数据定义变量
MUMVAR	定义 POST26 中允许的变量数
TVAR	以平衡迭代次数替代 TIME 变量
VARNAM	为变量命名或重命名



(续表)

命令	功能说明
TIMERANGE	定义拟存储数据的时间范围
LAYERP26	定义取用层单元何层的数据
FORCE	定义取用何类型的力数据
SHELL	定义取用 SHELL 何处的数据
STORE	指定变量存储
NSTORE	指定 TIME 点存储
RESET	将 POST1 和 POST26 恢复默认
FILE	指定数据文件

表 A.31 变量显示相关命令 (/POST26)

命令	功能说明
XVAR	定义图形显示的 X 轴
PLTIME	定义图形显示的时间范围
PLCPLX	定义图形显示复数的组成
PRCPLX	定义列表显示复数的格式
PRTIME	定义列表显示的时间范围
LINES	定义列表显示每页的行数
NPRINT	定义列表的时间点
SPREAD	为后续显示打开虚线误差曲线
PLVAR	图形显示变量
PRVAR	列表显示变量
EXTREM	列表显示变量的极值



附录 B ANSYS 结构分析常用单元总结

类别	单元类型
杆单元	LINK1, LINK8, LINK10, LINK11, LINK180
梁单元	BEAM3, BEAM4, BEAM23, BEAM24, BEAM44, BEAM54, BEAM188, BEAM189
管单元	PIPE16, PIPE17, PIPE18, PIPE20, PIPE59, PIPE60
板单元	PLANE2, PLANE25, PLANE42, PLANE82, PLANE83, PLANE145, PLANE146, PLANE182, PLANE183
壳单元	SHELL28, SHELL41, SHELL43, SHELL51, SHELL61, SHELL63, SHELL91, SHELL93, SHELL99, SHELL143, SHELL150, SHELL181, SHELL208, SHELL209
实体单元	SOLID45, SOLID46, SOLID64, SOLID65, SOLID72, SOLID73, SOLID92, SOLID95, SOLID147, SOLID148, SOLID185, SOLID186, SOLID187, SOLID191
弹簧单元	COMBIN7, COMBIN14, COMBIN37, COMBIN39, COMBIN40
质量单元	MASS21
接触单元	CONTAC12, CONTAC52, TARGE169, TARGE170, CONTAC171, CONTAC172, CONTAC173, CONTAC174, CONTAC175, CONTAC178
矩阵单元	MATRIX27, MATRIX50
表面效应元	SURF153, SURF154
粘弹实体元	VISC088, VISC089, VISC0106, VISC0107, VISC0108
超弹实体元	HYPER56, HYPER58, HYPER74, HYPER84, HYPER86, HYPER158
耦合场单元	SOLID5, PLANE13, FLUID29, FLUID30, FLUID38, SOLID62, FLUID79, FLUID80, FLUID81, SOLID98, FLUID116, FLUID129, FLUID130
界面单元	INTER192, INTER193, INTER194, INTER195
显示动力分析单元	LINK160, BEAM161, PLANE162, SHELL163, SOLID164, COMBI165, MASS166, LINK167, SOLID168



参 考 文 献

1. 赵经文, 王宏钰. 结构有限元分析 (第2版). 北京: 科学出版社, 2001.
2. 王勖成. 有限单元法基本原理和数值方法 (第2版). 北京: 清华大学出版社, 1997.
3. 王焕定. 有限单元法教程. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
4. <http://www.caesv.cn/>
5. ANSYS 基本过程手册. ANSYS 公司, 2000.
6. ANSYS 建模与分网分析指南. ANSYS 公司, 2000.
7. Saeed Moaveni 著, 王崧, 刘丽娟 等译. 有限元分析——ANSYS 理论与应用 (第3版). 北京: 电子工业出版社, 2008.
8. 博弈创作室. ANSYS 9.0 经典产品基础教程与实例详解. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
9. 李黎明. ANSYS 有限元分析实用教程. 北京: 清华大学出版社, 2005.
10. 刘相新. ANSYS 基础与应用教程. 北京: 科学出版社, 2006.
11. APDL 参数化命令使用指南. ANSYS 公司, 2000.
12. 龚曙光, 谢桂兰 等. ANSYS 操作命令与参数化编程. 北京: 机械工业出版社, 2004.
13. ANSYS 结构分析指南. ANSYS 公司, 2000.
14. <http://www.e-works.net.cn/>
15. 张胜民. 基于有限元软件 ANSYS7.0 的结构分析. 北京: 清华大学出版社, 2003.
16. 尚晓江, 邱峰 等. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
17. 张朝晖. ANSYS11.0 结构分析工程应用实例解析(第2版). 北京: 机械工业出版社, 2008.
18. 郝文化 等. ANSYS 土木工程应用实例 (第2版). 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
19. 王呼佳, 陈洪军 等. ANSYS 工程分析进阶实例. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
20. ANSYS 高级技术分析指南. ANSYS 公司, 2000.
21. 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析. 北京: 人民交通出版社, 2007.



反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010)88254396; (010)88258888

传 真：(010)88254397

E-mail：dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036